



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESEIAAT

STUDY OF THE BOEING 737-800 MAX STRUCTURE AND REPRODUCTION OF A 1:25 SCALE MODEL

Alumne:

Subías Hueso, Josep

Director:

Lordan Gonzalez, Oriol

Grau en Enginyeria en Tecnologies Aeroespacials

30 de juny de 2020

Resum

L'objectiu del projecte és realitzar una anàlisi estructural del Boeing 737-800 MAX, després fer el disseny 3D de l'estructura i construir el model a escala 1:25.

Aquesta aeronau ha sofrit diversos accidents catastròfics i acumula un gran nombre de morts per al poc de temps que ha estat operativa. Per aquest motiu resulta interessant realitzar un estudi estructural de l'aeronau i analitzar quins van ser els motius pels quals es van produir les catàstrofes així com també construir un model a escala per visualitzar d'una manera més entenedora l'estructura del Boeing 737-800 MAX.

Inicialment, s'ha realitzat una recerca sobre la història de l'aeronau i s'han ordenat cronològicament els diversos accidents que ha tingut. També s'ha comparat amb el Boeing 737-800 Next Generation que és el predecessor del Boeing 737-800 MAX. Posteriorment, s'ha realitzat un estudi genèric de les parts principals d'una aeronau comercial i després s'ha aprofundit en l'estudi particular del Boeing 737-800 MAX. Una vegada s'ha estudiat tota l'estructura, s'ha procedit a realitzar el disseny 3D de l'aeronau i per últim s'ha construït el model a escala 1:25 amb les peces que s'han dissenyat prèviament.

El disseny 3D de l'aeronau s'ha realitzat amb la màxima precisió possible i sempre intentant respectar la posició de les diferents parts de l'aeronau. No obstant, han hagut algunes modificacions per a poder adaptar correctament el disseny a l'escala 1:25.

Per últim, cal destacar que en el disseny 3D s'han invertit més hores de les estimades però, gràcies a aquest esforç en aquesta part, després ha estat molt més fàcil i ràpida la construcció del model a escala, ja que les peces pràcticament encaixaven entre si.

Abstract

The aim of the project is to perform a structural analysis of the BOEING 737-800 MAX, then make the 3D design of the structure and build the model at a scale of 1:25.

This aircraft has suffered several catastrophic accidents and has accumulated a large number of deaths for the short time it has been operational. For this reason it is interesting to make a structural study of the aircraft and analyze why the plane crashed as well as build a scale model in order to visualize in a more understandable way the structure of the Boeing 737- 800 MAX.

Initially, some research has been done on the history of the aircraft and the several accidents it has had have been sorted chronologically. The plane has also been compared to the Boeing 737-800 Next Generation, the predecessor of the Boeing 737-800 MAX. Subsequently, a generic study of the main parts of commercial aircrafts has been carried out and then an in-depth study of the Boeing 737-800 MAX has been performed. Once the whole structure has been studied, the 3D design of the aircraft has been carried out and finally a 1:25 scale model has been built with the parts that have been previously designed.

The 3D design of the aircraft has been made with the maximum precision and always trying to respect the position of the different parts of the aircraft. However, there have been some modifications to be able to properly adapt the design to the 1:25 scale.

Finally, it should be noted that in the 3D design more hours have been invested than the estimated but, thanks to the effort in this part, then it has been much easier and faster to build the scale model, as the pieces practically fit together.

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair a la meva família per animar-me i recolzar-me, no tan sols durant el projecte sinó també durant tot el grau. En especial als meus pares i al meu germà per ajudar-me i donar-me el suport emocional necessari per seguir endavant en els moments més difícils.

També voldria donar les gràcies als meus companys de grau que m'han ajudat en alguns dubtes que han anat sorgint al llarg del projecte.

I especialment, agrair a l'Oriol Lordan, director del projecte, per confiar en mi i donar-me l'oportunitat de fer aquest projecte així com també per resoldre els dubtes que m'han sorgit durant la seva realització.

Índex

1	Introducció	6
1.1	Objectiu	6
1.2	Abast	6
1.3	Antecedents i justificació	7
1.4	Requeriments	7
2	Estat de l'Art	8
2.1	Boeing Commercial Airplanes	8
2.2	Història del Boeing 737 MAX	9
2.2.1	L'accident del vol 610 de Lion Air	10
2.2.2	L'accident del vol 302 d'Ethiopian Airlines	11
2.3	El Boeing 737-800 MAX	12
2.3.1	Diferències entre el Boeing 737-800 MAX i el Next Generation	13
2.4	Especificacions tècniques del Boeing 737-800 MAX	14
2.5	Geometria i dimensions del Boeing 737-800 MAX	16
2.5.1	Geometria i dimensions generals del Boeing 737-800 MAX	16
2.5.2	Geometria i dimensions del fuselatge del Boeing 737-800 MAX	17
2.5.3	Geometria i dimensions de les ales del Boeing 737-800 MAX	19
2.5.4	Geometria i dimensions dels estabilitzadors de cua del Boeing 737-800 MAX	20
3	Estructura del Boeing 737-800 MAX	22
3.1	Introducció	22
3.2	Estructura del fuselatge	23
3.3	Estructura de l'ala	25
3.3.1	Estructura dels winglets	27
3.4	Estructura de l'estabilitzador de cua	28
4	Disseny 3D del Boeing 737-800 MAX	29
4.1	Bases del disseny	29
4.2	Disseny del fuselatge	31
4.2.1	Disseny de la cabina de passatgers	31
4.2.2	Disseny de la cabina de comandament	34
4.2.3	Disseny del con de cua	35
4.2.4	Disseny dels travessers del fuselatge	36
4.3	Disseny de l'ala	37
4.3.1	Disseny dels travessers de l'ala	38
4.3.2	Disseny de les costelles de l'ala	40
4.3.3	Disseny dels winglets	41
4.3.4	Disseny de la unió de l'ala amb el fuselatge	41
4.4	Disseny de l'estabilitzador horitzontal	43
4.4.1	Disseny dels travessers de l'estabilitzador horitzontal	44
4.4.2	Disseny de les costelles de l'estabilitzador horitzontal	46
4.4.3	Disseny de la unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge	47
4.5	Disseny de l'estabilitzador vertical	48
4.5.1	Disseny dels travessers de l'estabilitzador vertical	50
4.5.2	Disseny de les costelles de l'estabilitzador vertical	51
4.5.3	Disseny de la unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge	52

4.6	Vistes del disseny de l'aeronau	54
5	Tall làser de les peces	58
6	Construcció del model a escala 1:25	61
6.1	Introducció	61
6.2	Construcció de la prova	61
6.3	Construcció del model a escala	63
6.3.1	Llimada de les peces	65
6.3.2	Unió entre l'ala i el fuselatge	65
6.3.3	Unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge	67
6.3.4	Quadernes entre les ales i els estabilitzadors de cua	69
6.3.5	Quadernes davanteres	71
6.3.6	Costelles i winglets	72
6.4	Vistes del model a escala	74
7	Conclusions	77

Índex de figures

1	Boeing Business Jets. D'esquerra a dreta i de dalt a baix: 747, 777, 787 i 737 MAX (Boeing)	8
2	Presentació del Boeing 737-800 MAX a Renton (Mike Siegel / The Seattle Times)	9
3	Motor del vol 610 de Lion Air recuperat del mar de Java (Beawiharta / Reuters)	10
4	Esquema representatiu del funcionament del MCAS (The Air Current)	11
5	Motor dessoterrat del vol 302 d'Ethiopian Airlines (Tiksa Negeri / Reuters)	11
6	Velocitats verticals dels vols 610 de Lion Air i 302 d'Ethiopian Airlines (Flight Radar 24)	12
7	Comparació de les dimesions d'un Boeing 737-800 Next Generation (color groc) sobreposat amb un Boeing 737-800 MAX (color rosa) amb la línia que denota el CG en capcineig (Leeham Co)	13
8	Comparació dels motors del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX (Boeing)	13
9	Comparació dels winglets del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX	14
10	Comparació de les cues del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX (Airliners)	14
11	Abast de l'aeronau en funció de la massa de càrrega de pagament (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E - 2019)	15
12	Representació de l'abast del Boeing 737-800 MAX amb màxima càrrega de pagament (Great Circle Mapper, Boeing)	15
13	Alçat del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)	16
14	Perfil del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)	16
15	Planta del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)	17
16	Vistes de la secció del fuselatge del Boeing 737-800 MAX (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E, 2019)	18
17	Distribucions habituals dels seients d'un Boeing 737-800 MAX (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E, 2019)	18
18	Estabilitzadors de cua del Boeing 737-800 MAX amb el timó de direcció amb els colors de la companyia aèria Southwest Airlines (Huy Do / Southwest Airlines)	21
19	Forces sobre una aeronau en vol (Boeing (retocada))	23
20	Parts principals del fuselatge d'un Boeing 787 Dreamliner (Reuters)	23
21	Estructura de la secció central d'un Boeing 737 Next Generation (Todd Cindeman / The Washington Post)	24
22	Mampara de pressió d'un Boeing 747 (Air Team Images)	25
23	Distribució de pressió sobre un perfil alar (mh-aerotoools)	25
24	Distribució de sustentació al llarg d'una ala (Olivier Cleynen)	25
25	Vista detallada de l'interior de l'estructura d'una ala (aircraftsystemstech)	26
26	Vista detallada del revestiment d'una ala (aircraftsystemstech)	26
27	Vista en planta de l'interior de l'estructura d'una ala (aircraftsystemstech)	27
28	Efectes d'un winglet tipus Blended (Phil Geib / Chicago Tribune)	27
29	Estructura d'un winglet tipus Blended d'un Boeing 737 Next Generation (Flight Global)	28
30	Estructura de l'estabilitzador de cua d'un Boeing 737-700 Next Generation (Flight International)	28
31	Representació gràfica de la secció d'una peça tallada amb làser	30
32	Estructura del Boeing 737-800 Next Generation (Mike Badrocke / Boeing Aircraft Cutaways)	30
33	Disseny del fuselatge amb el mòdul <i>Image & Shape Design</i> de CATIA	31
34	Seccions del Boeing 737-800 MAX i del Next Generation	32
35	Disseny de la secció del fuselatge en CATIA	32
36	Contorns de l'aeronau al llarg del fuselatge (Boeing Next Generation MFE PD)	33
37	Vista en alçat de les quadernes involucrades en la unió de l'ala i el fuselatge	33
38	Quadernes de la cabina de passatgers	34
39	Diferents vistes dels esbossos de la cabina de comandament	34
40	Quadernes de la cabina de comandaments	35
41	Diferents vistes dels esbossos del con de cua	35
42	Quadernes del con de cua	36

43	Multi-secció de totes les quadernes del fuselatge	36
44	Travesser superior del fuselatge	36
45	Travesser a 120° del fuselatge	37
46	Disseny complet del fuselatge de l'aeronau	37
47	Vista en planta de la superfície de l'ala	38
48	Vista en alçat de la superfície de l'ala	38
49	Diagrama de l'ala d'una aeronau Boeing	39
50	Travessers davanter i posterior de l'ala esquerra de l'aeronau	39
51	Intersecció entre els travessers esquerres i drets de l'ala de l'aeronau	40
52	Contorn de les costelles de l'ala de l'aeronau	40
53	Costelles de l'ala esquerra de l'aeronau acoblades als travessers	40
54	Vista en planta de les costelles i travessers de les ales de l'aeronau	41
55	Diferents vistes del disseny dels winglets de l'aeronau	41
56	Unió de l'ala amb el fuselatge sense costelles ni quadernes	42
57	Unió de l'ala amb el fuselatge	42
58	Vista en detall de la intersecció dels travessers i les quadernes en la unió de l'ala amb el fuselatge	43
59	Diferents vistes de la unió de l'ala amb el fuselatge	43
60	Creació del perfil de l'estabilitzador horitzontal en XFLR5	44
61	Diferents vistes de la superfície de l'estabilitzador horitzontal	44
62	Diagrama de l'estabilitzador horitzontal d'una aeronau Boeing	45
63	Travessers esquerres davanter i posterior de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau	45
64	Intersecció entre els travessers esquerres i drets de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau	46
65	Contorn de les costelles de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau	46
66	Costelles de l'estabilitzador horitzontal esquerre de l'aeronau acoblades als travessers	47
67	Vista en planta de les costelles i travessers de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau	47
68	Unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge sense costelles ni quadernes	47
69	Unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge	48
70	Vista en planta de l'estabilitzador horitzontal	48
71	Vista en alçat de l'estabilitzador horitzontal	48
72	Creació dels perfils de l'estabilitzador vertical en XFLR5	49
73	Diferents vistes de la superfície de l'estabilitzador vertical	50
74	Diagrama de l'estabilitzador vertical d'una aeronau Boeing	50
75	Travessers davanter i posterior de l'estabilitzador vertical de l'aeronau	51
76	Contorn de les costelles de l'estabilitzador vertical de l'aeronau	51
77	Costelles de l'estabilitzador vertical de l'aeronau acoblades als travessers	52
78	Unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge sense les quadernes afectades	52
79	Unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge	53
80	Diferents vistes de la intersecció de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge	53
81	Vista 3D del disseny del Boeing 737-800 MAX	54
82	Vista en alçat del disseny del Boeing 737-800 MAX	54
83	Vista de perfil del disseny del Boeing 737-800 MAX	54
84	Vista en planta del disseny del Boeing 737-800 MAX	55
85	Vista en detall de la unió de l'ala amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX	56
86	Vista en detall de la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX amb algunes peces ocultes	56
87	Vista en detall de la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX	57
88	Arxiu DXF per a la prova enviat a l'empresa de tall làser	58
89	Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 1	59

90	Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 2	59
91	Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 3	60
92	Vista isomètrica de la prova del model	61
93	Vista en alçat de la prova del model	62
94	Vista en planta de la prova del model	62
95	Vistes en detall de la prova del model	62
96	Planxa del tall làser 1	63
97	Planxa del tall làser 2	63
98	Planxa del tall làser 3	64
99	Peces ordenades segons les diferents parts de l'aeronau	64
100	Representació gràfica de la secció d'una peça tallada amb làser	65
101	Forat d'una quaderna per a que pugui encaixar amb el travesser de l'ala	65
102	Vista isomètrica de la unió entre l'ala i el fuselatge	66
103	Vista en alçat de la unió entre l'ala i el fuselatge	66
104	Vista en planta de la unió entre l'ala i el fuselatge	66
105	Vista en detall de l'interior de la unió entre l'ala i el fuselatge	67
106	Vista isomètrica de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge	68
107	Vista de perfil de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge	68
108	Vista en detall de l'interior de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge	69
109	Vista isomètrica de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua	70
110	Vista en alçat de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua	70
111	Vista en detall de l'interior de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua	70
112	Vista isomètrica del model a escala sense costelles ni winglets	71
113	Vista en alçat del model a escala sense costelles ni winglets	71
114	Vista en detall de la unió entre la part davantera i posterior de l'aeronau	72
115	Vista en detall de la intersecció entre les costelles de l'ala	72
116	Vista en detall de la intersecció entre les costelles de l'estabilitzador horitzontal	73
117	Vista isomètrica del winglet en l'ala	73
118	Vista de perfil del winglet en l'ala	74
119	Vista isomètrica del model a escala finalitzat	74
120	Vista en planta del model a escala finalitzat	75
121	Vista en alçat del model a escala finalitzat	75
122	Vista de perfil del model a escala finalitzat	76
123	Vista en detall dels estabilitzadors de cua del model a escala finalitzat	76

Índex de taules

1	Especificacions tècniques principals del Boeing 737-800 MAX [2] [16]	14
2	Dimensions principals del Boeing 737-800 MAX [2] [16]	17
3	Dimensions del compartiment inferior de càrrega [16]	18
4	Geometria i dimensions del fuselatge del Boeing 737-800 MAX [2] [16]	19
5	Geometria i dimensions de les ales del Boeing 737-800 MAX [2] [16]	19
6	Geometria i dimensions dels winglets del Boeing 737-800 MAX [16] [1]	20
7	Geometria i dimensions de l'estabilitzador horitzontal del Boeing 737-800 MAX [16] [1]	20
8	Geometria i dimensions de l'estabilitzador vertical del Boeing 737-800 MAX [16] [1]	20

Introducció

1.1 Objectiu

Aquest projecte es pot dividir en dues parts. En la primera part es durà a terme una anàlisi de l'estructura del Boeing 737-800 MAX i es dissenyarà l'estructura de l'aeronau. En la segona part es construirà un model a escala 1:25 gràcies a les peces del disseny 3D tallades amb una talladora làser.

1.2 Abast

Per poder construir un model a escala utilitzant les mesures del disseny 3D, els aspectes que es desenvoluparan al llarg del treball estaran directament relacionats amb l'anàlisi estructural, el disseny 3D de l'estructura i la fabricació del model a escala de l'aeronau. Seguidament, es mostren les tasques que es realitzaran al llarg del projecte:

- Primer es farà un estudi històric de l'aeronau on s'analitzaran i s'exposaran els motius pels quals va ser dissenyada i les seves especificacions tècniques, així com també per quina raó ha tingut i segueix tenint tants accidents.
- A continuació, s'analitzarà més detalladament l'estructura del Boeing 737-800 MAX on es determinaran el nombre, la forma i les dimensions de les quadernes, les costelles i els travessers que formen l'estructura de l'aeronau.
- Una vegada l'estructura ha estat analitzada, s'estudiaran els canvis necessaris i l'elecció del material per a que sigui viable la construcció del model a escala. Aquests canvis seran els mínims possibles per tal de respectar la forma original de l'estructura principal ja que l'objectiu és reproduir amb màxima precisió l'estructura del Boeing 737-800 MAX.
- Seguidament, es dissenyarà en 3D l'estructura del model que en un futur es construirà. Per fer el disseny 3D s'emprarà el software CATIA on es dissenyarà cada una de les parts que incorporarà el model final. A l'hora de fer el disseny es respectaran les dimensions màximes establertes per l'empresa que dugui a terme els talls amb la talladora làser.
- Amb el disseny 3D fet, es crearan els plànols de totes les peces que conté el model i els arxius DXF.
- Gràcies als arxius DXF que obtinguts anteriorment, es tallaran, amb una talladora làser, cadascuna de les peces que formaran part del model final, les peces seran del material seleccionat prèviament.
- Per últim, amb les peces ja tallades, es muntarà el model a escala de l'estructura del Boeing 737-800 MAX.

Dins de l'abast també cal incloure els documents a presentar junt amb el lliurament del projecte. Aquests documents són els que es mostren a continuació.

- La memòria del projecte.
- Els annexos de la memòria del projecte.

- Els plànols de les peces que formen l'estructura del Boeing 737-800 MAX.
- El pressupost del projecte.

1.3 Antecedents i justificació

L'empresa americana Boeing va dissenyar la flota d'avions Boeing 737 MAX per substituir a la seva flota d'avions ja existents, els Boeing 737 Next Generation, i per a competir amb el seu equivalent europeu l'Airbus A320 Neo. L'empresa europea Airbus va llançar al mercat l'Airbus A320 Neo en gener de 2016. Aquest fet va provocar que Boeing es precipités a l'hora de posar en funcionament els Boeing 737 MAX, la qual cosa va fer en maig de 2017. Aquestes presses podrien ser les causants de que els avions sortissin defectuosos i tinguessin dos accidents fatals on no van quedar supervivents [17].

Per aquesta raó resulta interessant analitzar l'estructura del Boeing 737-800 MAX en detall. No obstant, l'enfocament que es realitzarà serà molt pràctic i no es realitzarà cap anàlisi teòrica de càrregues estructurals. L'avantatge d'aquest enfocament és que, al realitzar el model a escala, es podran observar amb més claredat i de manera més entenedora cadascuna de les parts de l'estructura de l'aeronau. L'inconvenient que té aquest enfocament és que, al no realitzar-se cap anàlisi teòrica de les càrregues de l'estructura de l'aeronau, no es podrà conèixer el comportament detallat de l'estructura sotmesa a càrregues, ja que aquesta anàlisi seria tan extensa que podria fer-se un altre projecte sencer.

1.4 Requeriments

Seguidament es mostren una sèrie d'especificacions i requeriments que s'han establert i que es compliran al llarg del projecte:

- Requeriments tècnics:

L'objectiu final del treball és construir un model de l'estructura de l'aeronau Boeing 737-800 MAX. S'ha establert que l'escala del model serà 1:25 per a que es puguin tallar correctament les peces necessàries. Es farà un tractament especial en algunes peces que, tot i haver escollit aquesta escala, siguin massa petites per a que la talladora làser les pugui tallar correctament. Aquestes peces s'ometran o bé seran substituïdes per unes altres, sempre respectant al màxim el disseny original de l'aeronau.

- Requeriments econòmics:

Tot i que es pretén que el model de l'aeronau sigui el més acurat possible es realitzarà amb una limitació econòmica. El pressupost del projecte serà un factor limitant ja que es tracta d'un projecte realitzat per un alumne que no disposa de cap tipus de finançament ni ajuda econòmica. Per tant, l'elecció del material i dels mètodes emprats en el transcurs del projecte seran els més precisos possibles però sempre tenint en compte aquest factor econòmic.

- Requeriments davant la manca d'informació:

El Boeing 737-800 MAX és una de les aeronaus més polèmiques, ja no tan sols dins de la flota de Boeing sinó de totes les aeronaus comercials, per la qual cosa l'empresa americana Boeing no comparteix tanta informació d'aquesta aeronau com de les altres de la seva flota. Degut a que existeix aquesta falta d'informació en alguns dels aspectes de l'aeronau, s'utilitzarà el Boeing 737-800 Next Generation per obtenir la informació que manca. El Boeing 737-800 és l'aeronau més semblant al Boeing 737-800 MAX, ja que aquest últim és una adaptació del primer amb uns motors més potents i més eficients que Boeing va dissenyar per a poder competir amb els nous avions eficients que l'empresa Airbus va llançar al mercat.

Estat de l'Art

2.1 Boeing Commercial Airplanes

L'empresa Boeing és una empresa multinacional estatunidenca amb seu en Seattle (Washington) que es dedica al disseny, fabricació i venda d'aeronaus. Aquesta està subdividida en cinc divisions principals. Una d'aquestes subdivisions és l'anomenada Boeing Commercial Airplanes, l'encarregada de tot allò relacionat amb el disseny, fabricació i venda d'avions comercials.

Boeing conta amb una gran varietat d'avions entre els que podem destacar per la seva rellevància els llistats a continuació [10]:

- El **Boeing 737 Next Generation** és un avió a reacció de fuselatge estret i de curt i mitjà abast.
- El **Boeing 737 MAX** és l'evolució del Boeing 737 Next Generation. Aquest grup es va fer famós per els seus múltiples accidents i és en el que centrarem l'estudi d'aquest projecte.
- El **Boeing 747**, també conegut com a "Jumbo", és famós per la seva grandària. Va ser l'avió de passatgers més gran durant quatre dècades fins que va arribar l'avió A380 de l'empresa europea Airbus.
- El **Boeing 767** és un avió de fuselatge ample i es caracteritza per ser el primer aparell bimotor construït per la companyia nord-americana.
- El **Boeing 777** és un avió a reacció de llarg abast i fuselatge ample. És el primer avió comercial dissenyat completament amb disseny assistit per ordinador.
- El **Boeing 787**, més conegut com "Dreamliner". És un avió de fuselatge ample amb doble passadís i molt eficient en quant a consum de combustible.
- Els **Boeing Business Jets** són avions de la companyia Boeing adaptats per al mercat d'aviació corporativa o privada.



Figura 1: Boeing Business Jets. D'esquerra a dreta i de dalt a baix: 747, 777, 787 i 737 MAX (Boeing)

En aquest projecte ens centrarem en els avions de la classe Boeing 737 MAX ja que l'avió estudiat pertany a aquest grup. No obstant, no podrem ignorar els Boeing 737 Next Generation en alguns aspectes ja que es tracten dels predecessors dels Boeing 737 MAX.

2.2 Història del Boeing 737 MAX

L'estudi de reemplaçament del Boeing 737 Next Generation, projecte anomenat "Yellowstone 1" (Y-1), va començar en 2005 però es va suspendre en 2008. Boeing havia estat buscant un reemplaçament que oferira una millora del 20-25% en costos operatius i esperava utilitzar tecnologies del Boeing 787 per aconseguir la seva missió. Malauradament, les millores esperades van ser tan sols del 10%. El problema principal d'aquest baix percentatge va ser que l'espai que es necessitava per gestionar els sistemes del Boeing 787 era més gran que l'espai disponible.

Per tant, una part del retard va ser degut a que Boeing va haver d'esperar fins que es desenvolupessin noves tecnologies en motors, aerodinàmica, materials i altres sistemes. Un altre factor clau va ser l'alta i sòlida demanda de comandes del Boeing 737 Next Generation [13].

El projecte "Yellowstone 1" va romandre sense activitat fins juliol de 2011, després de conèixer que la companyia estatunidenca American Airlines estava preparada per fer una comanda de 200 nous avions Airbus A320 Neo. Llavors, Boeing va abandonar els plans de fer un nou petit avió per tal de reacondicionar el Boeing 737, el MAX. El 30 d'agost de 2011 Boeing va llançar el disseny del Boeing 737 MAX.

En 2015, els gestors de la Federal Aviation Administration (FAA), l'entitat governamental responsable de la regulació de tots els aspectes de l'aviació civil als Estats Units, van pressionar els enginyers de l'agència de seguretat que es feia càrrec de les avaluacions de seguretat a Boeing per aprovar ràpidament l'anàlisi resultant. A finals d'aquest any Boeing va presentar el primer Boeing 737 MAX en la Boeing Renton Factory, ubicada a Renton (Washington), es tractava d'un Boeing 737-800 MAX.



Figura 2: Presentació del Boeing 737-800 MAX a Renton (Mike Siegel / The Seattle Times)

Més endavant, el 19 de gener de 2016, es va realitzar el primer vol d'un Boeing 737 MAX. A continuació, el 12 de maig de 2016 l'empresa nord-americana va prometre accelerar uns mesos el lliurament del primer 737 MAX ja que tres mesos enrere Airbus havia lliurat el primer Airbus A320 Neo.

Un any més tard, el 9 de maig de 2017 la FAA anunciava que ha havia certificat el Boeing 737-800 MAX i el 16 de maig de 2017 el primer Boeing 737-800 MAX va ser lliurat a Marindo Air, una filial de Lion Air, amb seu a Malàisia [8].

2.2.1 L'accident del vol 610 de Lion Air

El dilluns 29 d'octubre de 2018, el vol 610 de la companyia Lion Air amb destinació Pangkal Pinang, la capital provincial d'una petita illa del mar de Java, va enlairar de l'Aeroport Internacional Soekarno-Hatta a les 6:21 del matí (hora local).

Minuts després de l'enlairament la tripulació va contactar amb els controladors de trànsit aeri i van sol·licitar la tornada al Soekarno-Hatta. L'avió mai va emetre una trucada d'auxili i tampoc va tornar enrere. En lloc d'això, va efectuar un gir cap a l'esquerra i va realitzar desnivells importants just abans de caure bruscament des d'una alçada d'uns 5000 m altitud segons les dades proporcionades pel Flight Radar 24, encarregat de rastrejar el trànsit aeri mundial. A les 6:32, les comunicacions amb l'aeronau havien cessat.

L'avió es va submergir al mar amb tanta força que alguns accessoris de metall de l'aeronau es van desintegrar. Van perdre la vida el total de les 189 persones que es trobaven a bord. Aquesta va ser la primera catàstrofe del Boeing 737-800 MAX.

Temps després es va descobrir que el pilot va perdre el control degut a que l'ordinador a bord havia estat funcionant amb dades incorrectes [4].



Figura 3: Motor del vol 610 de Lion Air recuperat del mar de Java (Beawiharta / Reuters)

El Boeing 737 MAX té un sistema de control computacional de l'estabilitat de l'aeronau anomenat Sistema d'Augment de les Característiques de Maniobra (MCAS). Aquest sistema és l'encarregat de que l'avió no entre en pèrdua (stall). El funcionament del sensor és el següent [5]:

- Els sensors al nas de l'avió mesuren l'angle d'atac.
- L'estabilitzador horitzontal ajusta la seva posició si l'angle d'atac és massa gran.
- Per tant, quan l'estabilitzador rectifica la seva posició provoca que el nas de l'avió baixi.
- Però si la lectura del sensor és incorrecta, el que fa és empenyer el nas de l'avió de totes formes provocant que l'avió comenci a descendir.
- El pilot pot desactivar el MCAS tenint el control manual temporalment i fent que el nas de l'aeronau torni a la posició correcta. Però, el sistema es reinicia i torna a posar el control del MCAS si la falsa lectura continua provocant una batalla entre l'avió i la tripulació.

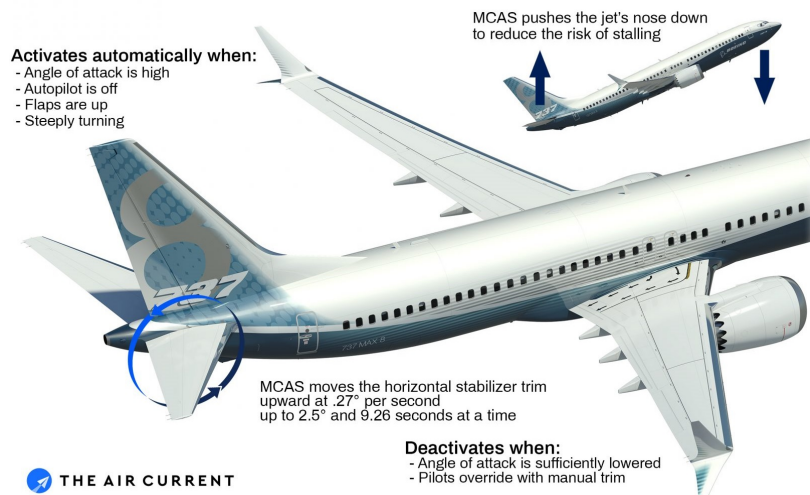


Figura 4: Esquema representatiu del funcionament del MCAS (The Air Current)

Boeing va reconèixer en un comunicat que els investigadors d'Indonèsia van informar que l'avió havia experimentat lectures errònies de l'angle d'atac i va aconsellar als pilots seguir en aquest cas els "procediments existents de la tripulació de vol". Aquests procediments inclouen apagar els motors elèctrics que mouen els estabilitzadors de la cua de l'avió i prendre el control manual de l'aeronau.

La FAA va advertir que podrien existir condicions insegures en altres productes del mateix disseny [4].

Tot i això, Boeing va informar d'unes noves 5.011 comandes del Boeing 737 MAX de 79 clients diferents el 31 de gener de 2019 [8].

2.2.2 L'accident del vol 302 d'Ethiopian Airlines

El 10 de març de 2019, el vol 302 d'Ethiopian Airlines amb destinació Nairobi, capital de Kenya, va començar el seu vol des de l'Aeroport Internacional de Bole, situat en la capital d'Etiòpia Addis Adaba, a les 8:38 del matí (hora local).

Sis minuts després de l'enlairament, a les 8:44, va tenir l'accident a uns 48 km al sud-est de l'aeroport, prop de la ciutat de Bishoftu.

L'impacte va ser tan gran que els dos motors van quedar soterrats a una profunditat de 10 metres, en un cràter de 28 metres d'amplada i 40 metres de llarg.



Figura 5: Motor dessoterrat del vol 302 d'Ethiopian Airlines (Tiksa Negeri / Reuters)

L'informe preliminar sobre l'accident va dir que l'enlairament de l'avió semblava ordinari. No obstant això, poc temps després dos sensors que mesuraven l'angle de vol de l'avió van començar a registrar lectures diferents.

Els investigadors van remarcar similituds en les dades de vol transmeses pels dos Boeing 737 MAX que es van estavellar a Etiòpia i Indonèsia. Tal i com es pot veure a la figura 6 les lectures de velocitat vertical d'ambdós casos són molt similars, es poden veure pics molt elevats que representen una velocitat d'ascens i de descens molt elevada. Aquestes lectures de velocitat vertical eren errònies i, tal i com es pot veure a la figura, suggereixen que ambdós conjunts de pilots havien lluitat per mantenir un ascens constant després de l'enlairament [6].

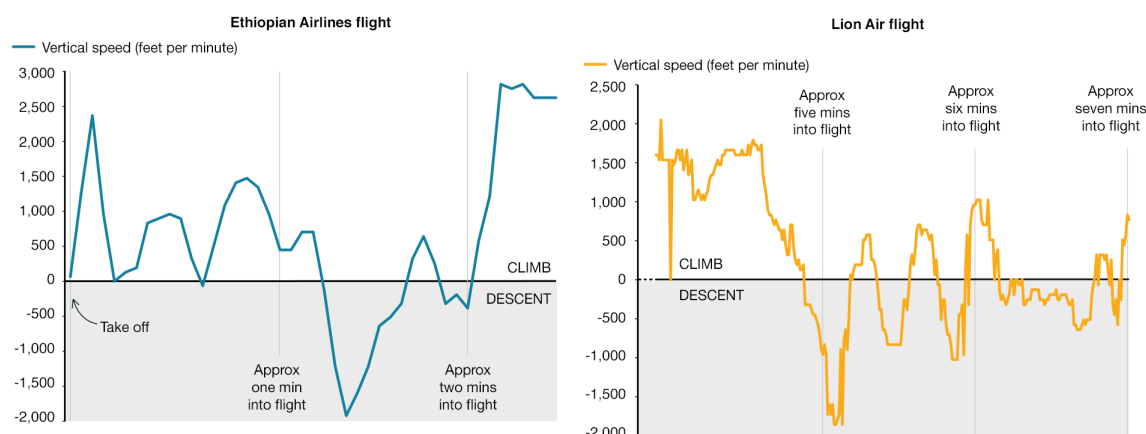


Figura 6: Velocitats verticals dels vols 610 de Lion Air i 302 d'Ethiopian Airlines (Flight Radar 24)

La FAA va afirmar que les proves recollides als dos llocs i les dades de satèl·lits mostraven que els dos vols es comportaven de manera similar.

Després de la caiguda de Lion Air, Boeing va enviar indicacions als pilots sobre com gestionar el MCAS, però es va retardar repetidament una solució de programari.

El 12 de març de 2019, dos dies després de l'accident d'Ethiopian Airlines els reguladors dels mercats clau com Canadà, la Unió Europea i l'Índia van prohibir els vols del Boeing 737 MAX en els seus respectius territoris. Un dia després, el 13 de març, la FAA va fer el mateix després de que els investigadors trobaren indicacions de que el MCAS podia haver estat involucrat en l'accident d'Ethiopian Airlines.

Més endavant, en abril de 2019, l'informe preliminar de l'accident va confirmar que els pilots d'Etiòpia van perdre el control malgrat seguir les indicacions proporcionades per Boeing [8].

Des d'aquest moment i fins l'actualitat el Boeing 737 MAX segueix tenint prohibit volar. L'empresa Boeing segueix fent comunicats sobre les millores de seguretat en els sistemes i segueix treballant junt amb la FAA i altres reguladors a nivell global en el procés per a certificar el programari del Boeing 737 MAX. Boeing va establir un fons d'ajuda de 100 milions de dòlars per a satisfer les necessitats de les famílies envoltades en aquests dos tràgics accidents [12].

2.3 El Boeing 737-800 MAX

En aquest projecte s'estudiarà el Boeing 737-800 MAX degut a que és l'aeronau més característica dins de la família dels Boeing 737 MAX, ja que va ser aquest el primer model que es va fabricar i a més va ser l'aeronau que va sofrir els dos accidents esmentats anteriorment.

2.3.1 Diferències entre el Boeing 737-800 MAX i el Next Generation

Aquesta aeronau deriva dels Boeing 737 Next Generation i Boeing va anunciar que aquest nou model seria el més eficient, el més competent i l'avió amb els costos operacionals més baixos del mercat d'un únic passadís.

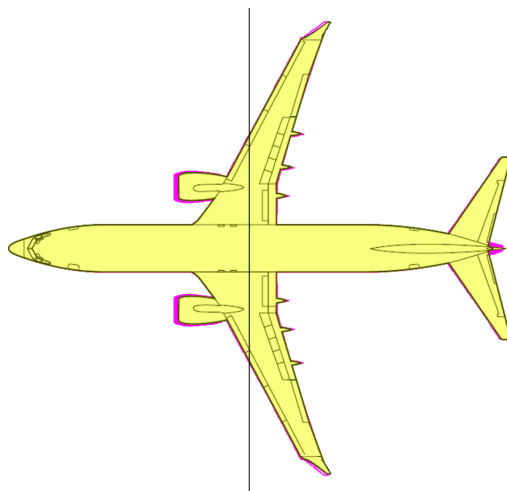


Figura 7: Comparació de les dimesions d'un Boeing 737-800 Next Generation (color groc) sobreposat amb un Boeing 737-800 MAX (color rosa) amb la línia que denota el CG en capcineig (Leeham Co)

Una de les principals diferències entre els Boeing 737 MAX i els Boeing 737 Next Generation és que el sistema de programari el tenen diferent. Aquest nou programari que incorporen els MAX (MCAS) és, a la vegada, el seu principal problema [7].

Una altra diferència important entre els dos models és que els MAX estan equipats amb uns motors més grans i més eficients en quant a consum de combustible. La posició d'aquests nous motors, al ser més grans, està desplaçada cap endavant fent que sobresurtin pel caire d'atac d'ala. Aquest fet fa que el centre de gravetat de l'avió estigui desplaçat cap endavant i és un dels motius pels quals es va desenvolupar aquest nou programari.



(a) Motor del Boeing 737-800 Next Generation



(b) Motor del Boeing 737-800 MAX

Figura 8: Comparació dels motors del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX (Boeing)

Tal i com es pot veure a la figura 8b, el motor del Boeing 737-800 MAX presenta una coberta dentada. Aquesta modificació redueix el soroll produït pels motors arribant a disminuir-ho un 40% durant l'enlairament i l'aterratge.

Una altra diferència que s'observa de seguida és l'incorporació de winglets més eficients de tipus Scimitar per part dels avions Boeing 737-800 MAX. D'altra banda els Boeing 737 Next Generation incorporen els habituals winglets tipus Blended.



(a) Winglet tipus Blended del Boeing 737-800 Next Generation (Turkish Airlines)



(b) Winglet tipus Scimitar del Boeing 737-800 MAX (Reuters)

Figura 9: Comparació dels winglets del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX

Per últim, els Boeing 737 MAX tenen una nova col·locació de la unitat auxiliar de potència (APU). Aquesta modificació fa que la cua del Boeing 737 MAX acabi amb forma més punxeguda, fet que ajuda a les millores aerodinàmiques de l'aeronau [3].

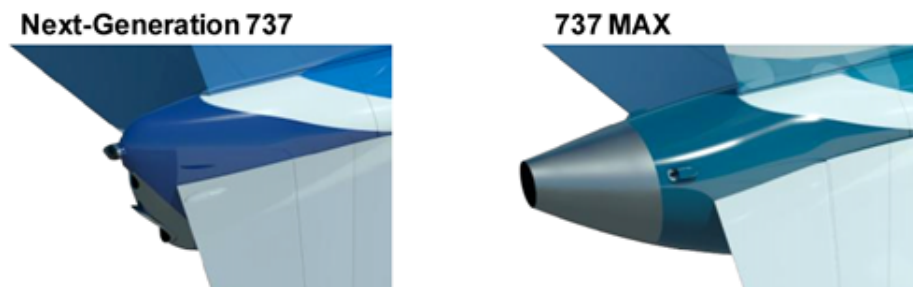


Figura 10: Comparació de les cues del Boeing 737-800 Next Generation i del Boeing 737-800 MAX (Airliners)

2.4 Especificacions tècniques del Boeing 737-800 MAX

A continuació, en la taula 1, es mostren les especificacions tècniques principals del Boeing 737-800 MAX:

Taula 1: Especificacions tècniques principals del Boeing 737-800 MAX [2] [16]

Pes màxim autoritzat per maniobrar en terra	82.417 Kg
Pes operacional en buit	45.070 Kg
Pes màxim d'enlairament	82.190 Kg
Pes màxim d'aterratge	69.309 Kg
Pes màxim sense combustible	65.952 Kg
Màxima càrrega de pagament	20.882 Kg
Capacitat de combustible	26.035 L
Abast màxim amb càrrega de pagament màxima	4630 Km
Velocitat màxima d'operació	Mach 0.82
Velocitat de creuer	Mach 0.785
Longitud de pista necessària per l'enlairament ¹	2.700 m
Longitud de pista necessària per l'aterratge ²	1.650 m
Sostre de servei	12496.8 m (41.000 ft)
Unitat propulsora	CFM LEAP 1B - 28B1
Cost aproximat	121.6M US \$

Tal i com podem veure a la taula 1, la unitat propulsora que incorpora el Boeing 737-800 MAX és una LEAP-1B de l'empresa CFM International, una unió entre l'empresa francesa Safran Aircraft Engines (Snecma) i l'empresa estatunidenca General Electric. Aquesta unitat propulsora ofereix un gran rendiment en l'àmbit econòmic, tècnic i mediambiental i una empenta màxima d'enlairament d'uns 124,5 KN. El Certificat Tipus de la CFM LEAP 1B va ser concedit simultàniament per l'Agència Europea de Seguretat de l'Aviació (EASA) com també per l'Administració Federal d'Aviació dels Estats Units (FAA) en maig de 2016 [11].

Per tal de tindre una millor representació de l'abast del Boeing 737-800 MAX s'adjunten a continuació la gràfica de l'abast de l'aeronau en funció de la massa de càrrega de pagament extreta de l'Airplane Characteristics for Airport Planning (ACAP) del Boeing 737-800 MAX i una representació de l'abast de l'aeronau al mapa del món.

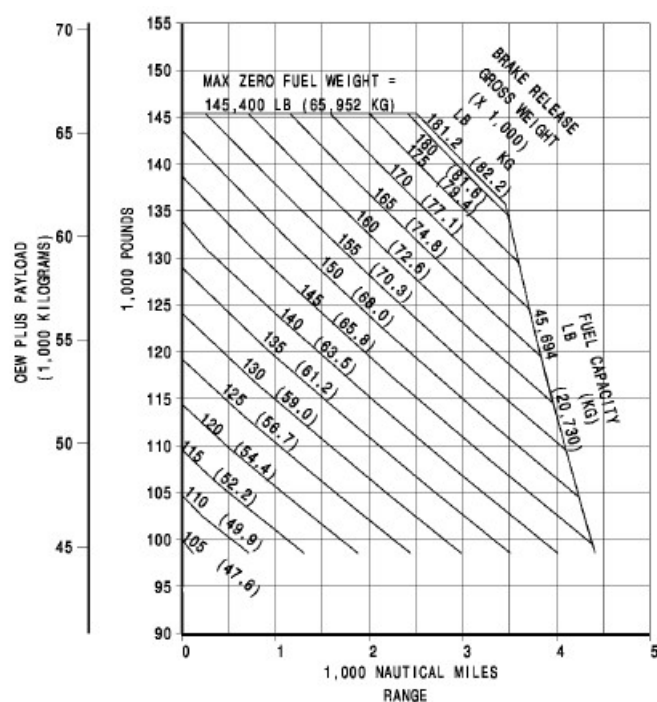


Figura 11: Abast de l'aeronau en funció de la massa de càrrega de pagament (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E - 2019)

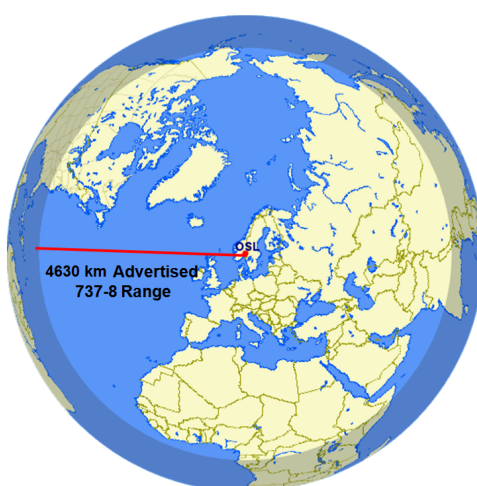


Figura 12: Representació de l'abast del Boeing 737-800 MAX amb màxima càrrega de pagament (Great Circle Mapper, Boeing)

¹ Mesures calculades amb pes màxim d'enlairament i amb condicions estàndard (a nivell del mar, temperatura de 15 °C, pista seca, sense vent i gradient de pista nul)

² Mesures calculades amb pes màxim d'aterratge, sistemes d'antipatinatge operatius, auto spoilers operatius, flaps a 30° i amb condicions estàndard (a nivell del mar, pista seca, sense vent, gradient de pista nul)

2.5 Geometria i dimensions del Boeing 737-800 MAX

En aquest apartat s'analitzaran les diferents parts de l'aeronau des del punt de vista de la seva geometria i les seves dimensions. Es mostraran les vistes principals de l'aeronau i després s'analitzarà la geometria i dimensions del fuselatge, de les ales, dels winglets i dels estabilitzadors horitzontal i vertical.

2.5.1 Geometria i dimensions generals del Boeing 737-800 MAX

A continuació, es mostren les tres vistes principals (alçat, planta i perfil) del Boeing 737-800 MAX i una taula on es recullen les dimensions principals de l'aeronau estudiat.

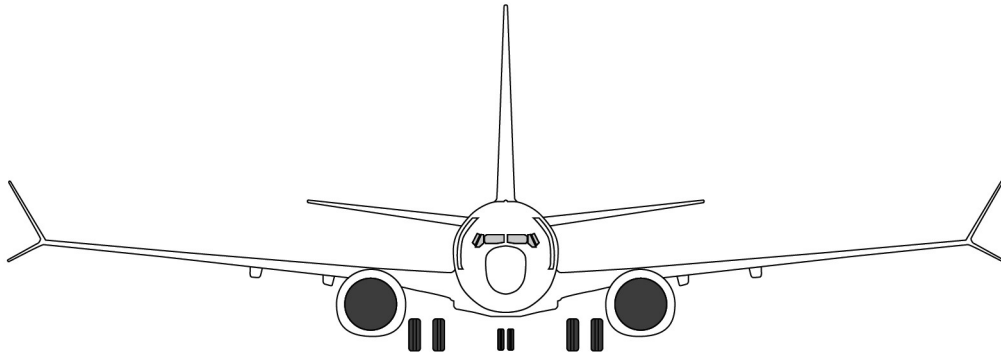


Figura 13: Alçat del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)

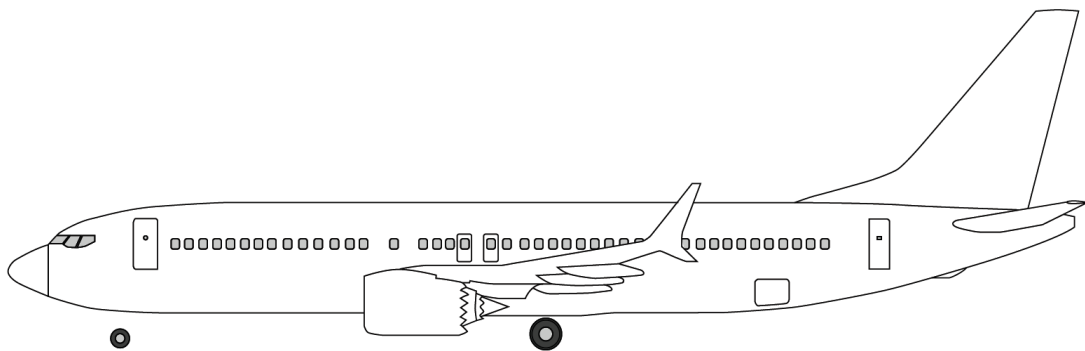


Figura 14: Perfil del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)

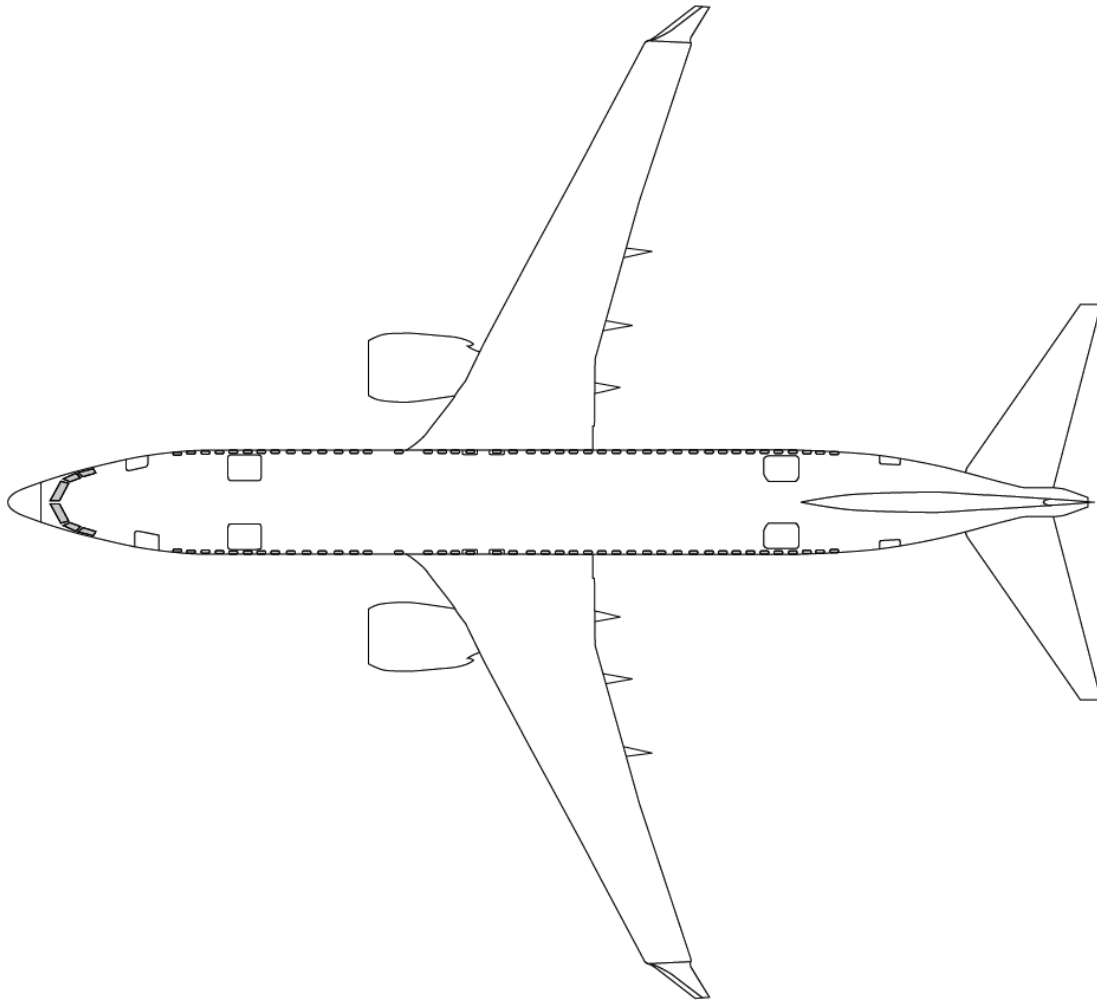


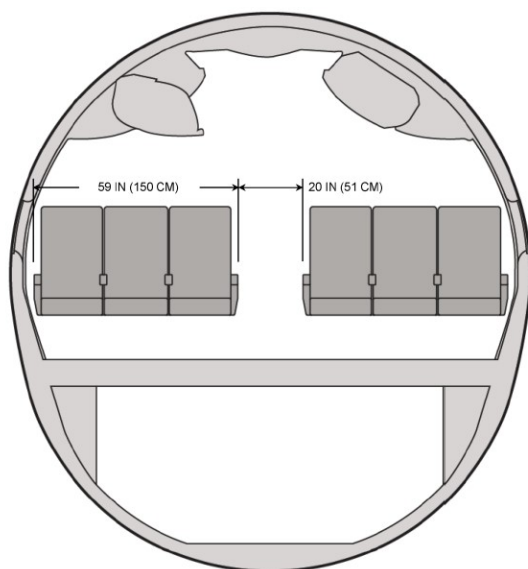
Figura 15: Planta del Boeing 737-800 MAX (The Blueprints)

Taula 2: Dimensions principals del Boeing 737-800 MAX [2] [16]

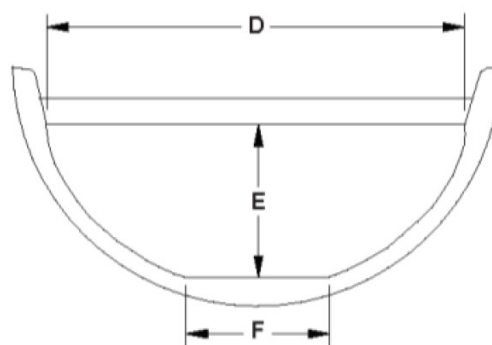
Longitud total de l'aeronau	39.47 m
Envergadura total de l'aeronau	35.92 m
Alçada total de l'aeronau	12.3 m
Amplada del tren d'aterratge	5.72 m
Distància entre el tren d'aterratge davanter i el principal	15.6 m

2.5.2 Geometria i dimensions del fuselatge del Boeing 737-800 MAX

Com es pot observar a la figura 16a la secció del fuselatge segueix la geometria habitual d'aeronaus comercials. A la figura 16b es pot veure amb més detall l'espai reservat per al compartiment inferior de càrrega amb les respectives mesures definides a la taula 3.



(a) Secció del fuselatge del Boeing 737-800 MAX



(b) Vista en detall del compartiment inferior de càrrega del Boeing 737-800 MAX

Figura 16: Vistes de la secció del fuselatge del Boeing 737-800 MAX (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E, 2019)

Taula 3: Dimensions del compartiment inferior de càrrega [16]

D	3.05 m
E	1.12 m
F	1.22 m

A continuació, es mostren les dues distribucions habituals de seients per un Boeing 737-800 MAX comercial. La primera configuració es tracta d'una classe mixta on es diferencien els seients de la classe business (12 seients) dels de la classe econòmica (166 seients), el que fa un total de 178 seients. D'altra banda, la segona configuració sols té un tipus de classe amb 189 seients.

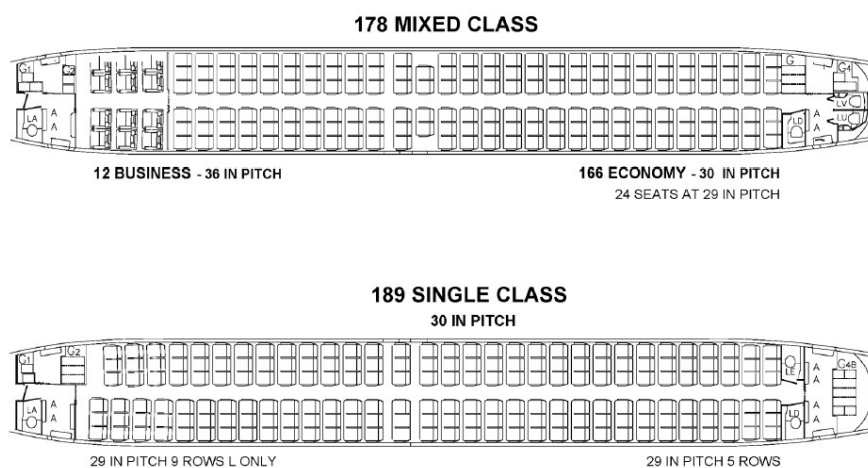


Figura 17: Distribucions habituals dels seients d'un Boeing 737-800 MAX (ACAP Boeing 737 MAX, Rev E, 2019)

Per últim, es mostren les dimensions i geometria del fuselatge de l'aeronau en la següent taula.

Taula 4: Geometria i dimensions del fuselatge del Boeing 737-800 MAX [2] [16]

Longitud del fuselatge	39.12 m
Alçada del fuselatge	4.01 m
Amplada exterior del fuselatge	3.76 m
Amplada de la cabina	3.53 m
Volum total del compartiment inferior de càrrega	43.6 m ²

2.5.3 Geometria i dimensions de les ales del Boeing 737-800 MAX

En la taula 5 estan definides les dimensions de les ales. La majoria de les dimensions s'han obtingut gràcies a l'ACAP del Boeing 737 MAX però altres mesures no hi apareixien. Les dimensions de la corda a la punta i a l'arrel de l'ala s'han escalat a partir de les vistes principals de l'aeronau.

Cal destacar que els perfils alars que s'han seleccionat són els dels Boeing 737 Next Generation degut a la manca d'informació que hi ha sobre els perfils alars dels Boeing 737 MAX. Gràcies a la pàgina web AirfoilTools s'han pogut obtenir els punts que defineixen la geometria de quatre perfils al llarg de l'ala. Aquests quatre perfils representen el perfil de l'ala a l'arrel, a la punta i, els altres dos, a les zones intermèdies de l'envergadura de l'ala [9].

Taula 5: Geometria i dimensions de les ales del Boeing 737-800 MAX [2] [16]

Envergadura de les ales	35.92 m
Superfície alar	127 m ²
Corda a l'arrel de l'ala	6.65 m
Corda a la punta de l'ala	1.82 m
Estretament de l'ala	0.27
Allargament de l'ala	10.16
Angle de diedre	6°
Angle de fletxa (1/4 de la corda)	25.03°
Perfil alar ³	b737a-il b737b-il b737c-il b737d-il

Geometria i dimensions dels winglets del Boeing 737-800 MAX

Tal i com s'ha comentat anteriorment en el projecte, els winglets de l'aeronau estudiada són del tipus Scimitar. A la figura 9b es veu clarament la seva forma característica amb dues aletes en comptes d'una com la majoria d'aeronaus comercials. Per trobar les seves dimensions s'han escalat diferents imatges de l'ACAP del Boeing 737 MAX. També ha estat de gran ajuda tindre unes referències sobre l'inclinació i les dimensions dels winglets del Boeing 737-800 Next Generation gràcies al "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment de Boeing", encara que els winglets dels Next Generation siguin de tipus Blended.

³Degut a la manca d'informació s'han seleccionat els perfils alars del Boeing 737 Next Generation [9]

Taula 6: Geometria i dimensions dels winglets del Boeing 737-800 MAX [16] [1]

Envergadura de l'aleta superior	2.65 m
Envergadura de l'aleta inferior	1.49 m
Corda a l'arrel de les aletes	1.82 m
Corda a la punta de l'aleta superior	0.42 m
Corda a la punta de l'aleta inferior	0.55 m
Angle entre aletes	87.42°
Angle entre l'aleta superior i la normal al terra	30.56°
Angle entre l'aleta inferior i la normal al terra	62.02°

2.5.4 Geometria i dimensions dels estabilitzadors de cua del Boeing 737-800 MAX

En aquest apartat s'analitzaran amb més detall els dos estabilitzadors de cua, tant l'estabilitzador horitzontal com el vertical.

Tal i com ha passat en l'anàlisi de la geometria i dimensions del fuselatge i les ales, les dimensions que no estan disponibles a cap lloc, han estat escalades a partir dels plànols de l'aeronau.

Els perfils seleccionats per als dos estabilitzadors, horitzontal i vertical, s'han extret del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment dels Boeing 737 Next Generation", ja que aquest mateix document no es troba disponible per als Boeing 737 MAX a la web de Boeing. Gràcies a aquest document hem pogut conèixer la forma dels perfils dels estabilitzadors. Una vegada sabíem la forma, es va utilitzar el programa informàtic XFLR5, una eina d'anàlisi per a dissenyar perfils, ales i aeronaus, per a crear els perfils. Com el programa dóna l'opció d'incorporar imatges, es van afegir les imatges dels estabilitzadors que havíem trobat anteriorment i es van crear els perfils amb la forma adequada [15].

A continuació, es mostren les taules amb la geometria i dimensions definides per a cada estabilitzador.

Estabilitzador horitzontal

Taula 7: Geometria i dimensions de l'estabilitzador horitzontal del Boeing 737-800 MAX [16] [1]

Envergadura de l'estabilitzador horitzontal	14.35 m
Superfície de l'estabilitzador horitzontal	32.78 m ²
Corda a l'arrel de l'estabilitzador horitzontal	3.30 m
Corda a la punta de l'estabilitzador horitzontal	0.82 m
Estretament de l'estabilitzador horitzontal	0.25
Allargament de l'estabilitzador horitzontal	6.28
Angle de diedre	7°
Angle de fletxa (1/4 de la corda)	30°

Estabilitzador vertical

Taula 8: Geometria i dimensions de l'estabilitzador vertical del Boeing 737-800 MAX [16] [1]

Alçada de l'estabilitzador vertical	7.16 m
Superfícies de l'estabilitzador vertical	26.44 m ²
Corda a l'arrel de l'estabilitzador vertical	8.01 m
Corda a la punta de l'estabilitzador vertical	1.59 m
Estretament de l'estabilitzador vertical	0.20
Allargament de l'estabilitzador vertical	1.94
Angle de fletxa (1/4 de la corda)	35°



Figura 18: Estabilitzadors de cua del Boeing 737-800 MAX amb el timó de direcció amb els colors de la companyia aèria Southwest Airlines (Huy Do / Southwest Airlines)

Estructura del Boeing 737-800 MAX

3.1 Introducció

Una vegada s'ha estudiat la geometria i les dimensions de l'aeronau realitzarem un estudi més exhaustiu sobre l'estructura del Boeing 737-800 MAX. Primer es parlarà sobre diversos conceptes generals per tal de poder entendre el funcionament i la posició de les diferents parts que conformen l'aeronau. Aquestes parts principals són el fuselatge, les ales, els dos estabilitzadors i les superfícies de control. En aquest projecte no s'estudiaran les superfícies de control ja que suposaria un augment excessiu de les hores de treball i de la dificultat del propi projecte.

Un dels punts més complicats i importants a l'hora de dissenyar i fabricar un aeronau és que sigui capaç de resistir les càrregues a les que es sotmet ja sigui quan està en rodadura o quan realitza un vol.

Quan parlem de les càrregues que suporta un avió en rodadura no ens referim tan sols a les càrregues a les que està sotmès mentre es desplaça a l'aeroport, sinó també a les que apareixen durant l'aterratge i l'enlairament.

En canvi, les càrregues a les que està sotmesa una aeronau durant el vol són les que es generen degut a la sustentació, generada per les superfícies sustentadores, i el propi pes de l'aeronau durant tot tipus de maniobres o ràfegues de vent. Les càrregues principals que apareixen durant el vol, si considerem que l'aeronau es mou sols en un pla, són les següents:

- **La sustentació (LIFT):** quan un fluid circula per la superfície d'un objecte exerceix una força sobre ell. Si el fluid és aire, aquesta força es coneix com a força aerodinàmica. La sustentació és la component de la força aerodinàmica que és perpendicular a la direcció del flux d'aire. Gràcies a la sustentació l'aeronau és capaç de compensar el seu propi pes.
- **La resistència aerodinàmica (DRAG):** força que contrasta amb la sustentació. Es tracta de la component de la força aerodinàmica que és paral·lela a la direcció del flux d'aire. La resistència aerodinàmica s'oposa al moviment i apareix sempre que hi ha sustentació ja que com s'ha dit abans són les dues components de la força aerodinàmica. Per tant, ens veiem obligats a generar una empenta major que aquesta força per tal de poder avançar en l'espai a una velocitat determinada.
- **L'empenta (THRUST):** força que generen els motors de l'aeronau per tal de combatre la resistència aerodinàmica i produir la sustentació necessària per poder volar.
- **El pes:** és la força que genera l'aeronau pel simple fet de tenir massa. Aquesta actua en el centre de masses de l'aeronau i apunta cap al centre de la Terra.

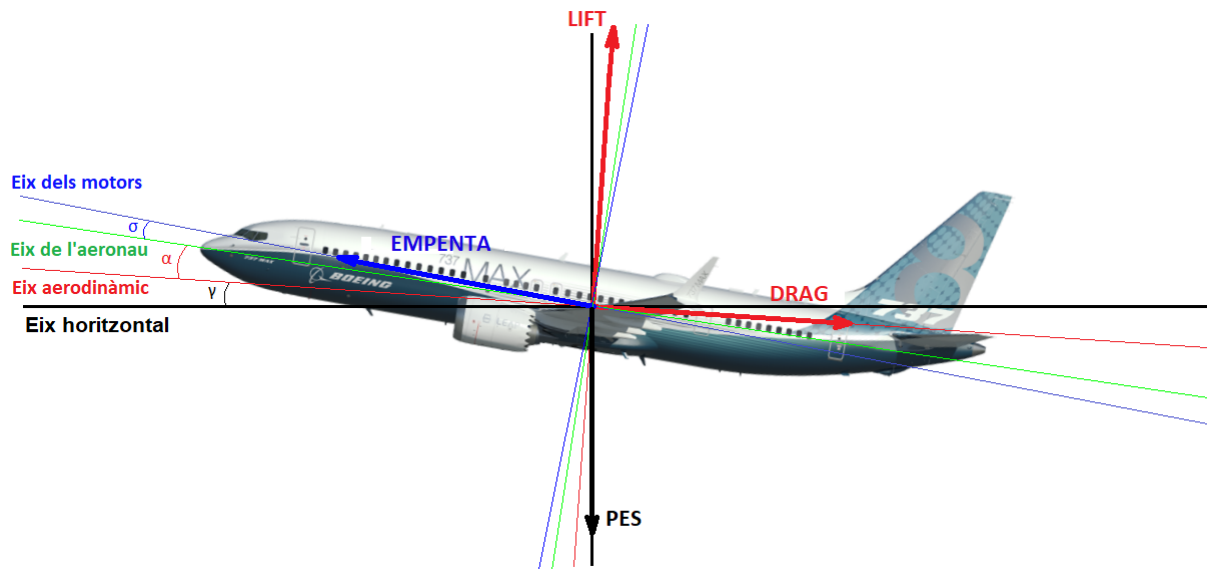


Figura 19: Forces sobre una aeronau en vol (Boeing (retocada))

Quan aquestes quatre forces estan en equilibri, és a dir, la suma de totes elles és nul·la, l'aeronau segueix un moviment rectilini uniforme, i es diu que es troba en creuer. En la realitat hi ha que tenir en compte moltes més forces ja que l'aeronau no es mou sempre dins d'un mateix pla. Per exemple, les ràfegues de vent poden provocar en l'aeronau càrregues lateral-direccionals.

3.2 Estructura del fuselatge

El fuselatge és probablement la part més important de l'aeronau ja que alberga la cabina, els passatgers i la càrrega. És la part principal de l'estructura on s'encasten la resta de parts de l'aeronau.

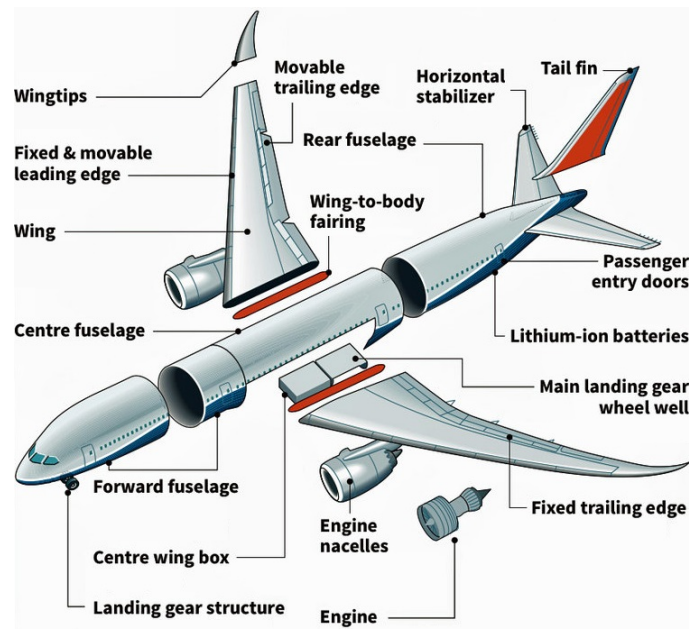


Figura 20: Parts principals del fuselatge d'un Boeing 787 Dreamliner (Reuters)

El tipus d'estructura més usual per als avions comercials és el semimonocasc. Amb aquest tipus d'estructura aconseguim que disminueixi la fatiga dels materials ja que tots aquests actuen a la vegada. Les diferents parts que componen una estructura tipus semimonocasc són les següents:

- **Quadernes** (frames): aquestes transfereixen les càrregues a la resta de l'estructura del fuselatge i proporcionen suport per als travessers i travesserets longitudinals. També s'encarreguen de suportar les càrregues degudes a la pressurització, en cas d'haver-hi. Les quadernes generalment tenen la forma d'anells, de manera que l'interior del fuselatge no quedi obstruït.
- **Travessers** (longerons): aquests normalment s'estenen longitudinalment al llarg de diverses quadernes i suporten les càrregues axials degudes a la tensió i compressió.
- **Revestiment** (skin): en una estructura de tipus semimonocasc les diferents parts de l'estructura s'enganxen al revestiment i també entre elles. El revestiment suporta els esforços de torsió i, junt amb les quadernes, resisteix les càrregues degudes a la pressurització, en cas d'haver-hi.
- **Travesserets** (stringers): aquests són més nombrosos i lleugers que els travessers. S'utilitzen per donar la forma desitjada a l'estructura i per unir les diferents parts al revestiment. També ajuden als travessers a resistir els esforços de tensió i compressió.
- **Mampara de pressió** (aft pressure bulkhead): és el component que proporciona un segell hermètic per als avions pressuritzats. Ajuda a suportar els esforços deguts a la pressurització. La mampara de pressió pot tenir una forma corba o plana.
- **Zones reforçades**: són reforços que milloren la resistència a diverses càrregues i esforços en zones com la unió de l'ala amb el fuselatge, la unió dels trens d'aterratge o al voltant de les portes d'accés a la cabina.

Seguidament, es mostren dues figures en les que s'il·lustren algunes de les parts llistades anteriorment.

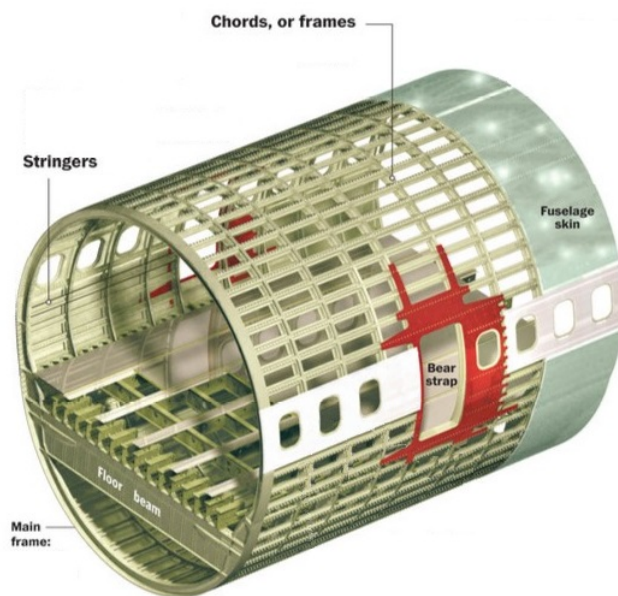


Figura 21: Estructura de la secció central d'un Boeing 737 Next Generation (Todd Cindeman / The Washington Post)



Figura 22: Mampara de pressió d'un Boeing 747 (Air Team Images)

3.3 Estructura de l'ala

L'ala és l'element principal encarregat de la sustentació d'una aeronau. La secció d'una ala es coneix com a perfil alar o perfil aerodinàmic. L'ala és capaç de produir una diferència de pressió entre la part superior de l'ala (l'extradós) i la part inferior (l'intradós) quan travessa un fluid gràcies a la geometria d'aquest perfil alar i sempre que existeixi una velocitat relativa entre l'ala i el fluid.

A la figura 23 podem veure una representació gràfica de la diferència de pressió que es produeix en un perfil aerodinàmic i, seguidament, a la figura 24 podem veure un exemple d'una distribució de sustentació realista al llarg d'un ala.

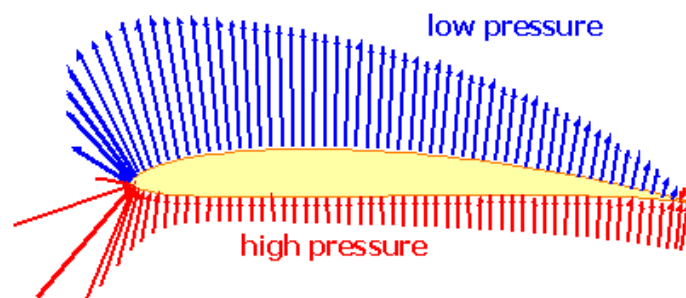


Figura 23: Distribució de pressió sobre un perfil alar (mh-aerotoools)

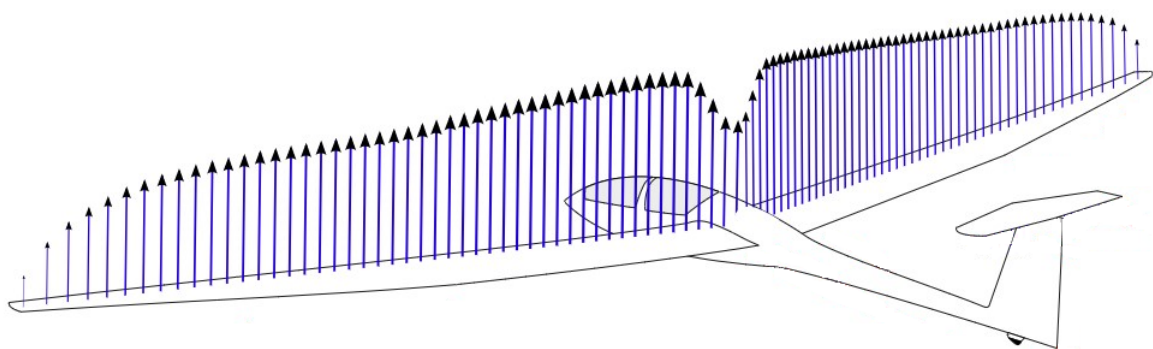


Figura 24: Distribució de sustentació al llarg d'una ala (Olivier Cleynen)

Després de definir l'ala i de parlar breument sobre les forces que actuen sobre ella passarem a analitzar l'estructura de la pròpia ala. Les diferents parts d'una ala són les llistades a continuació:

- **Costelles** (ribs): donen forma a l'ala gràcies a que cadascuna de les seccions té la forma del perfil aerodinàmic corresponent. Redistribueixen les càrregues al llarg de l'ala i resisteixen les càrregues de compressió. Solen tenir forats per reduir el pes estructural ja que normalment es construeixen d'una sola peça.
- **Costelles falses** (nose ribs / false ribs): s'utilitzen per garantir que l'ala segueix la forma desitjada entre les costelles principals.
- **Costella de compressió** (wing butt rib): Es tracta de la costella alar més pròxima al fuselatge. D'entre totes les costelles alars, aquesta serà la que més esforços de compressió haurà de suportar.
- **Travessers** (spars): com el seu nom indica són uns elements estructurals que travessen tota l'ala. S'encarreguen de suportar els esforços de flexió que sofreix l'ala. Normalment hi ha dos, una davantera (front spar) i una posterior (rear spar).
- **Travesser fals o de l'aleró** (false spars / aileron spars): s'utilitza per subjectar l'aleró en la posició correcta.
- **Revestiment** (skin): es tracta de la part més externa de l'estructura alar. Fa la funció de la "pell de l'ala".
- **Petits travessers** (stringers): formen part del revestiment i eviten que es produeixin esforços de vinclament al llarg de l'ala.
- **Tirants** (tire rod): la seva funció és resistir la reacció cap a enrere provocada en l'ala degut a la resistència aerodinàmica.
- **Tira de caire d'atac** (leading edge strip): s'encarreguen de que el caire d'atac mantingui una forma adequada i llisa.
- **Tira de caire de sortida** (trailing edge strip): s'encarreguen de que el caire de sortida mantingui una forma adequada i llisa.
- **Unió ala-fuselatge** (wing attach fittings): es tracta de la part del travessers que s'encasta dins de l'estructura dels fuselatge.

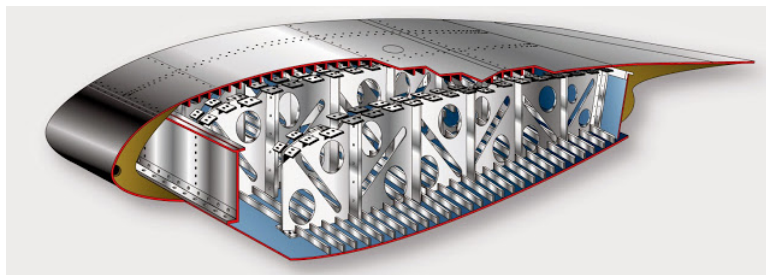


Figura 25: Vista detallada de l'interior de l'estructura d'una ala (aircraftsystemstech)

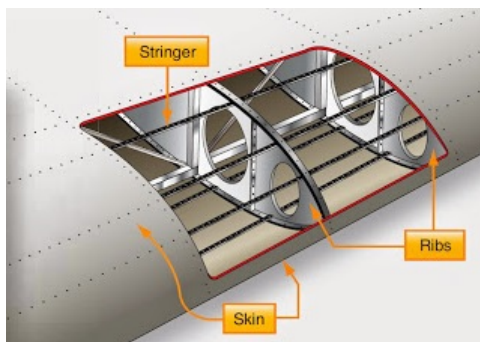


Figura 26: Vista detallada del revestiment d'una ala (aircraftsystemstech)

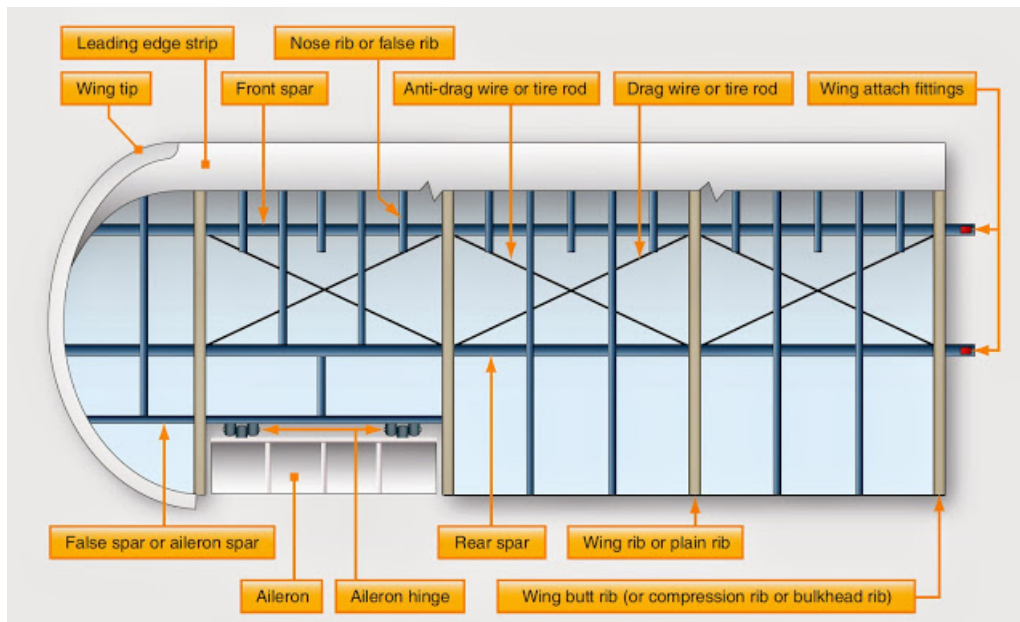


Figura 27: Vista en planta de l'interior de l'estructura d'una ala (aircraftsystemstech)

En el nostre disseny sols tindrem en compte les parts fonamentals de l'estructura de l'ala: les costelles i els travessers davanters i posteriors. Si es tinguessin en compte la resta de les parts la dificultat i el temps de dedicació del projecte creixerien de forma exponencial.

3.3.1 Estructura dels winglets

Els winglets són una extensió de l'ala amb un cert grau d'inclinació. La seva funció principal és reduir la turbulència a les puntes de les ales d'una aeronau. Aquesta turbulència es deu a que la pressió a la part inferior de l'ala (intradós) és més gran que la pressió a la part superior de l'ala (extradós). Aquesta diferència de pressió fa que, quan el flux d'aire que circula per les dues superfícies es troba a la punta de l'ala, formi un vòrtex. A la figura 28 podem veure com l'implementació d'un winglet redueix el vòrtex que es genera a la punta de l'ala. Gràcies als winglets es pot reduir la resistència aerodinàmica d'un avió, el que es tradueix en un estalvi de combustible.

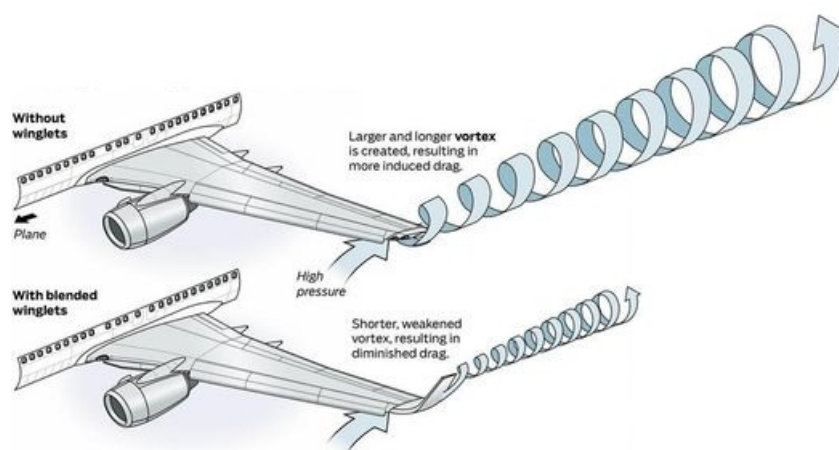


Figura 28: Efectes d'un winglet tipus Blended (Phil Geib / Chicago Tribune)

L'estructura d'un winglet és molt similar a la d'una ala. A la figura 29 podem veure que els elements principals de la seva estructura són els mateixos que per a una ala. Es poden distingir les costelles, els travessers i el propi revestiment d'un winglet.

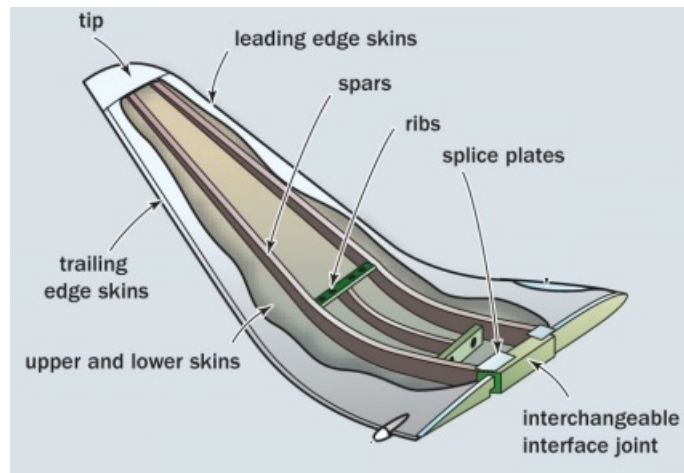


Figura 29: Estructura d'un winglet tipus Blended d'un Boeing 737 Next Generation (Flight Global)

En el projecte es dissenyaran els winglets tipus Scimitar característics dels Boeing 737 MAX, en lloc dels winglets tipus Blended. Degut a la manca d'informació es considerarà que l'estructura dels winglets tipus Scimitar segueix una configuració com la dels Blended, sols que els Scimitar incorporaran una aleta inferior.

3.4 Estructura de l'estabilitzador de cua

L'estabilitzador de cua d'una aeronau proporciona control longitudinal (pitch) gràcies a l'estabilitzador horitzontal. D'altra banda, l'estabilitzador vertical és l'encarregat de proporcionar estabilitat direccional (yaw). L'estructura, tant de l'estabilitzador horitzontal com del vertical, és molt semblant a l'estructura d'una ala.

L'estructura d'un estabilitzador de cua ha d'estar preparada per a resistir les altes càrregues degudes a esforços de fatiga i de flexió. També ha de sostindre les diferents superfícies de control, com el timó de direcció de l'estabilitzador vertical o l'elevador de l'estabilitzador horitzontal.

En la figura 30 podem observar l'estructura d'un estabilitzador de cua d'un Boeing 737-700 Next Generation. Si ens fixem podem veure la gran semblança entre els dos estabilitzadors i l'estructura d'una ala. Podem distingir diverses costelles i travessers, així com també, el revestiment dels dos estabilitzadors.

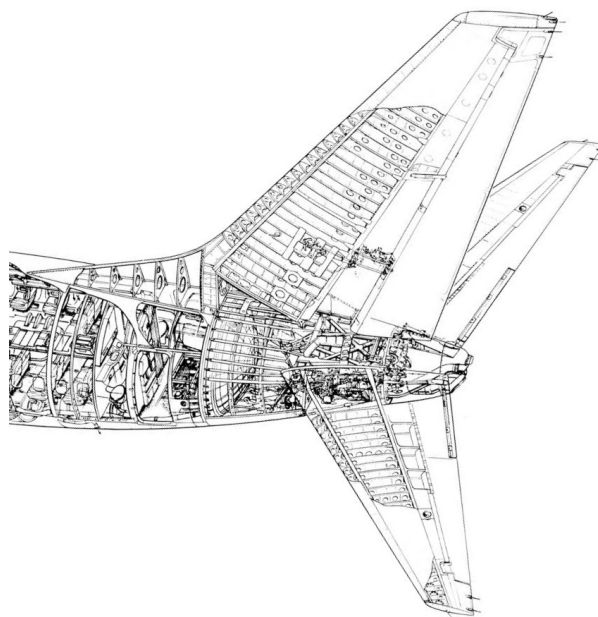


Figura 30: Estructura de l'estabilitzador de cua d'un Boeing 737-700 Next Generation (Flight International)

Disseny 3D del Boeing 737-800 MAX

4.1 Bases del disseny

Una vegada hem analitzat i estudiat l'estructura del Boeing 737-800 MAX ja podem començar a dissenyar el model 3D. Els plànols amb totes les dimensions de cadascuna de les peces es podran trobar en un document a banda. Per tant al llarg d'aquesta secció sols es comentaran les dimensions més importants i no s'entrarà en tant detall en les mides de cada peça.

En aquest apartat es definirà la manera de treballar i les directrius seguides durant el disseny 3D de l'aeronau. Tal i com es va establir a l'abast del projecte, el software emprat per a la realització del disseny 3D serà el CATIA, més concretament la versió V5R21. La versió més nova, la V6, que està disponible als ordinadors de la UPC no s'ha pogut utilitzar degut a l'actual situació de pandèmia. No obstant, no ha suposat cap problema ja que els comandaments són molt similars i perquè les eines necessàries per al correcte desenvolupament del disseny estaven totes disponibles. Durant el disseny treballarem a escala real amb les mateixes dimensions que hem obtingut de diferents documents i al final escalarem les peces a escala 1:25 per fer els documents DXF necessaris per a que l'empresa de tall làser pugui tallar les peces correctament.

Durant tot el disseny s'intentarà aconseguir la màxima precisió en les dimensions i la geometria de les peces. Les mesures que no estiguin disponibles en els diferents documents aconseguits s'extrapolaran de l'aeronau Boeing 737-800 Next Generation que, com ja s'ha comentat repetides vegades durant el desenvolupament del projecte, és el predecessor del Boeing 737-800 MAX. Els documents que han ajudat a dimensionar l'aeronau han estat l'ACAP dels Boeing 737 MAX i el "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment dels Boeing 737 Next Generation". També ha estat de gran ajuda la figura 32 on es pot veure l'estructura interna del Boeing 737-800 Next Generation i que dona una idea d'on estan col·locades les parts en el Boeing 737 MAX.

En el disseny 3D s'obviaran parts de l'estructura menors com travesserets o com les superfícies de control ja que degut al gruix del material en que es tallaran les peces, MDF de 3 mm, no s'apreciaria correctament la seva forma, a més a més, el disseny d'aquestes parts complicaria exponencialment la dificultat del treball, així com també augmentaria considerablement el temps de dedicació. Per tant, en el disseny del fuselatge sols es tindrà en compte les quadernes, tres travessers principals per tal de donar-li consistència i estabilitat a l'estructura i bigues de suport per a les unions de les ales i dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge. Pel que fa a les ales, es dissenyaran els travessers principals, les costelles i els winglets. Per últim, en el disseny dels estabilitzadors de cua es dissenyaran els travessers principals i les seves respectives costelles.

El primer que s'ha dissenyat han estat els esbossos de totes les peces que incorpora el model de l'aeronau. Una vegada es tenien els esbossos de les peces, s'han fet les extrusions pertinents de 75 mm (3 mm al model a escala) a cadascuna de les peces. A continuació, s'han trobat les interseccions entre les peces. Per últim, s'han realitzat els forats necessaris a cadascuna de les peces. Com que les interseccions entre les peces no són totes a 90° i la majoria de les talladores làser sols poden tallar a 90°, els forats s'han fet per on indiquen les línies vermelles a la figura 31 i després amb la llima s'han llimat les parts verdes indicades.



Figura 31: Representació gràfica de la secció d'una peça tallada amb làser

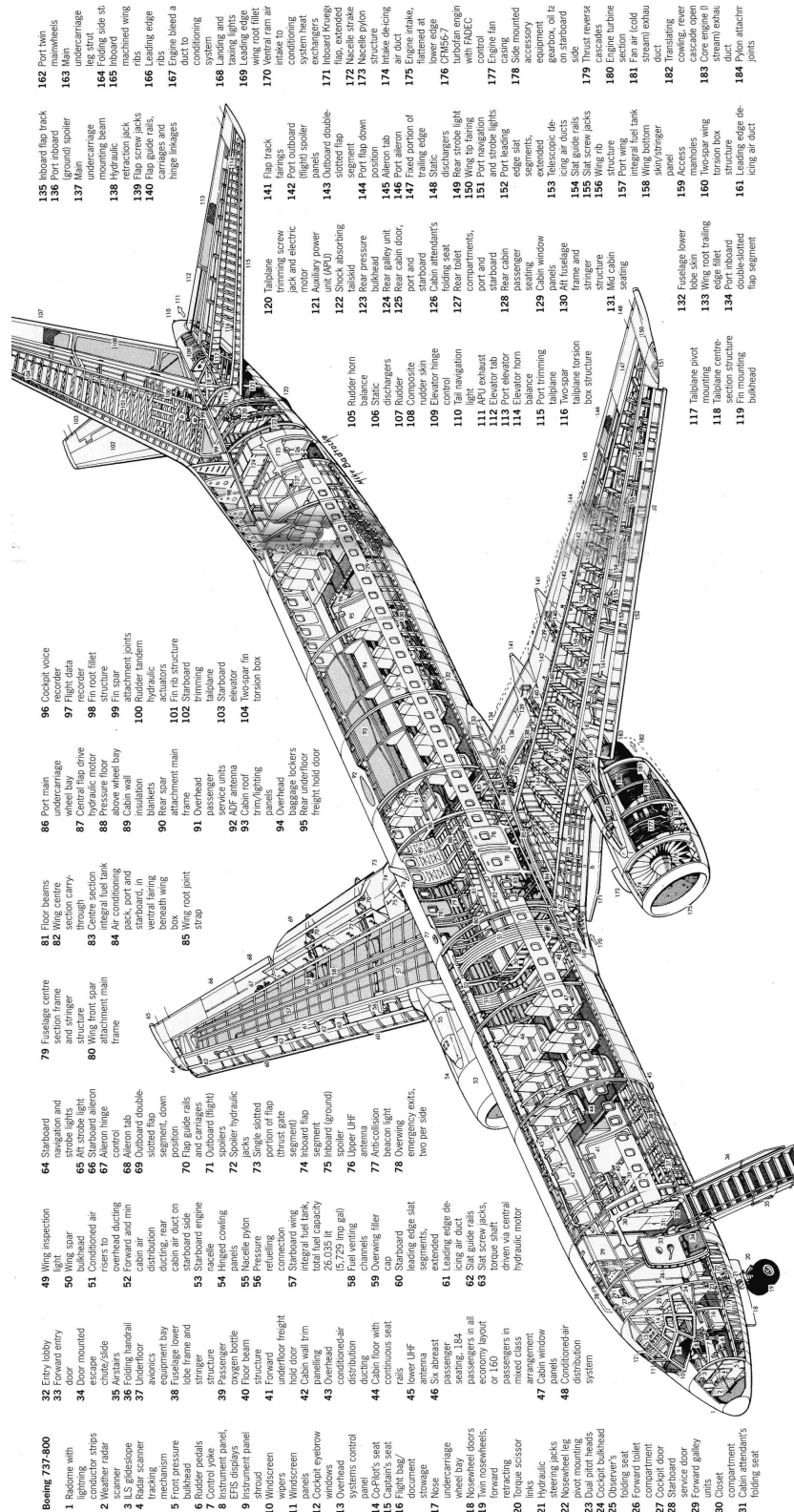


Figura 32: Estructura del Boeing 737-800 Next Generation (Mike Badrocke / Boieng Aircraft Cutaways)

4.2 Disseny del fuselatge

El fuselatge està format bàsicament per quadernes i per travessers que subjecten les quadernes al llarg de la longitud d'aquest. Després d'analitzar les diferents imatges i de fer l'estudi de l'estructura s'ha decidit que hi haurà un total de 79 quadernes separades 50,03 cm (20 mm al model). També es dissenyaran tres travessers principals separats de 120° cadascun per donar suport a l'estructura.

Les quadernes d'una aeronau real tenen una secció radial molt més petita que la que es pot representar en un model a escala 1:25 sense que es trenqui l'estructura. Per tant, s'ha considerat que les quadernes del model tindran una secció radial de 20 mm i un gruix de 3 mm, el qual vindrà definit pel propi gruix del material en que es tallaran les peces.

Per dissenyar el fuselatge primer es va optar per utilitzar el mòdul *Image & Shape Design* de CATIA. Aquest mòdul està dedicat a la creació de superfícies d'una forma ràpida i senzilla. Es van adquirir les vistes principals vectoritzades de l'aeronau en la pàgina web *the-blueprints* per tal de tenir-les com a suport en la creació del disseny del model. [14] Primer es va provar a fer el disseny amb una malla amb poc nombre de cel·les per veure el funcionament d'aquest mòdul, com es pot veure a la figura 33a. No obstant, per fer que el disseny sigui el més exacte i aproximat possible a la realitat, es va incrementar el nombre de cel·les de la malla obtenint un resultat que no complia amb la precisió desitjada. En la figura 33b es pot veure com quedava el disseny a l'augmentar el nombre de cel·les.

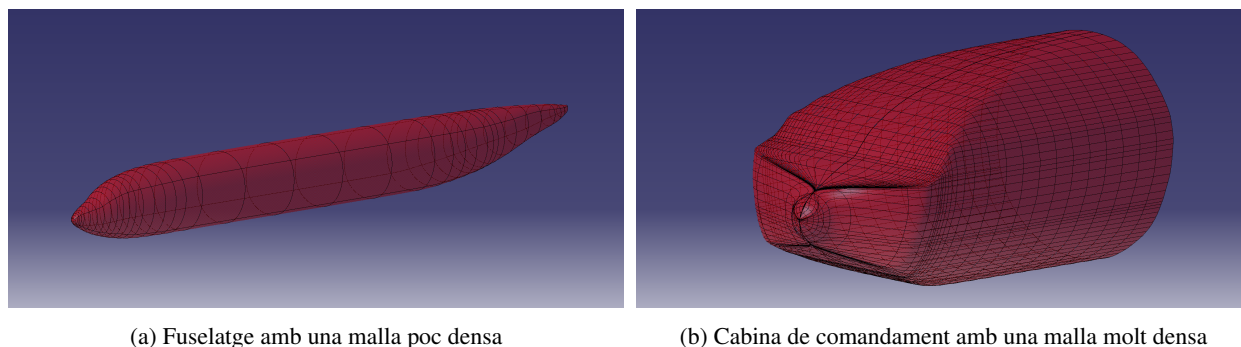


Figura 33: Disseny del fuselatge amb el mòdul *Image & Shape Design* de CATIA

Com que els resultats no eren els desitjats, es va canviar la forma de dissenyar el model i es va començar a dissenyar cada peça per separat utilitzant les dimensions i la geometria obtingudes en els apartats relacionats amb l'estudi estructural de l'aeronau.

El fuselatge es pot dividir en tres parts fonamentals: la cabina de passatgers, la cabina de comandament i el con de cua. En les següents seccions es parlarà de com s'ha dissenyat cadascuna de les peces d'aquestes tres parts.

4.2.1 Disseny de la cabina de passatgers

El disseny del fuselatge comença per la cabina de passatgers ja que la secció més característica es troba en aquesta part del fuselatge. En aquesta part, es dissenyaran 46 de les 79 quadernes, de la quaderna 11 a la 56, ambdues incloses. En la figura 34b es pot veure aquesta secció del Boeing 737-800 MAX. Com que no hi ha cap document disponible que proporcioni les dimensions d'aquesta secció per als Boeing 737 MAX es van utilitzar les dimensions proporcionades pel "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD) dels Boeing 737 Next Generation", figura 34a. Amb aquestes mesures es va fer l'esbós de la secció al CATIA amb gran precisió tal i com es pot veure a la figura 35.

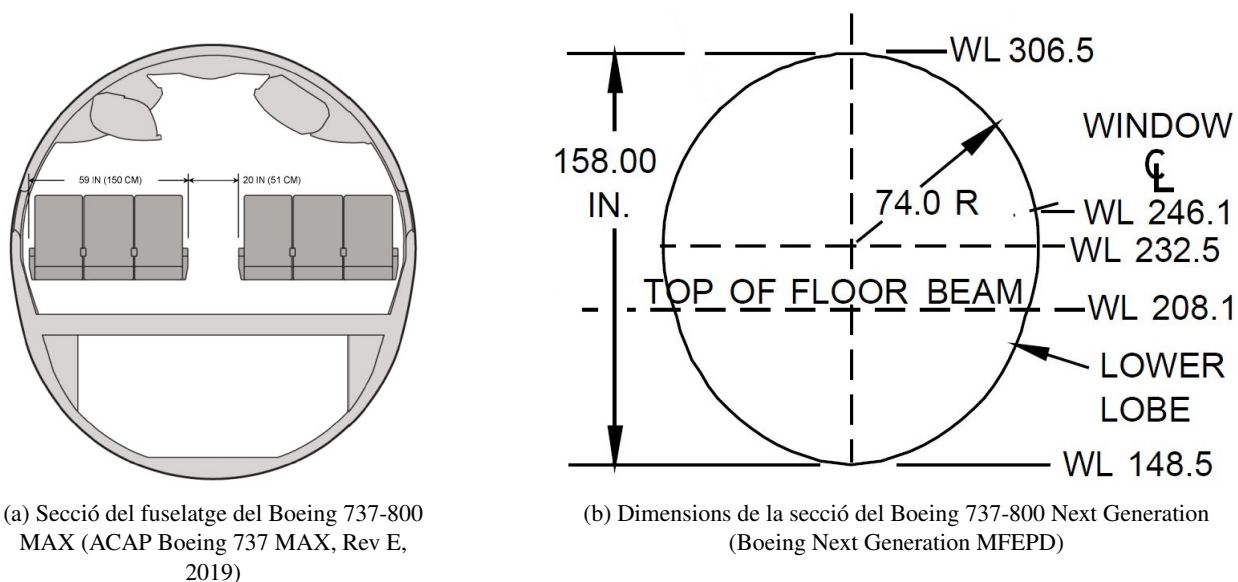


Figura 34: Seccions del Boeing 737-800 MAX i del Next Generation

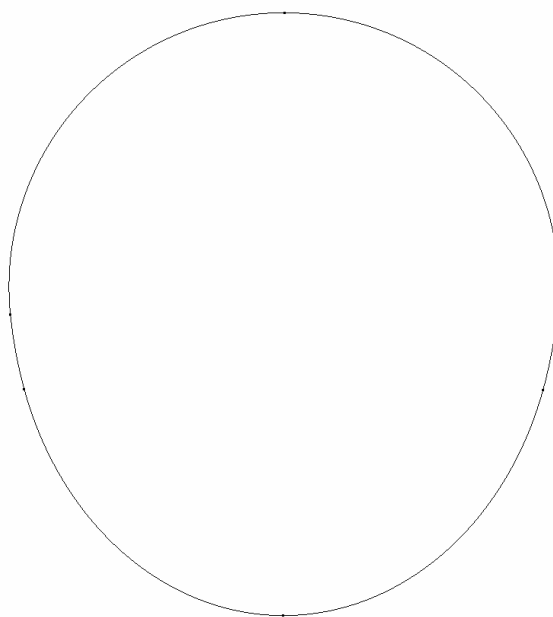


Figura 35: Disseny de la secció del fuselatge en CATIA

Una vegada aquesta secció estava dissenyada, es van utilitzar les gràfiques del contorn de les seccions que ens oferia el MFEPD del Boeing Next Generation i es van aproximar per a que encaixessin en l'aeronau Boeing 737-800 MAX. Aquestes gràfiques proporcionen el contorn exterior de l'aeronau en diferents ubicacions al llarg del fuselatge, es poden veure en la figura 36. Aquests contorns també ens serviran per a dissenyar la cabina de comandament i el con de cua. Una vegada tenim els esbossos de les seccions anteriors dissenyats a CATIA, es procedeix a dissenyar les quadernes restants escalant les ja existents i modificant els esbossos per tal de que tot quedi amb la màxima precisió possible. Per a aquesta part del modelat han estat de gran ajuda les vistes principals vectoritzades del Boeing 737-800 MAX que es van adquirir.

Degut a la unió de l'ala amb el fuselatge s'ha tingut que modificar la part inferior de les quadernes involucrades per a que segueixin de manera més precisa el contorn real de l'aeronau. En la figura 37a es pot veure la vista en alçat des del primer esbós involucrat fins a l'esbós del contorn de la quaderna més gran, la quaderna que suportarà part de

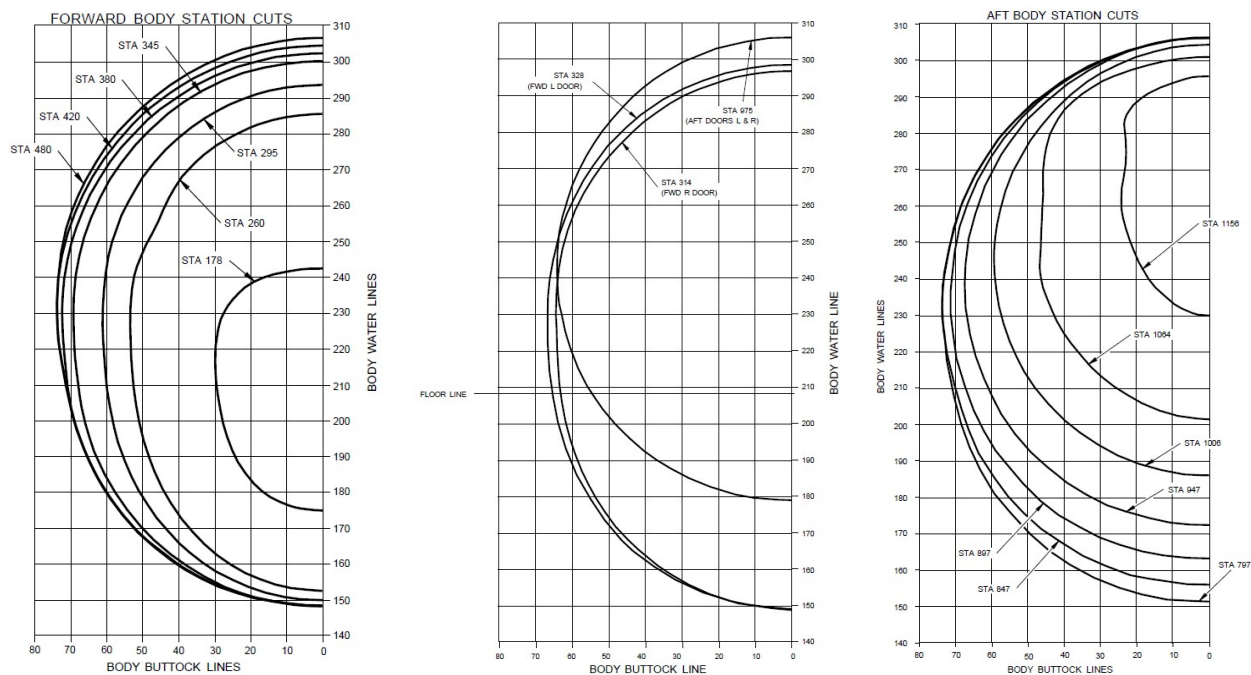
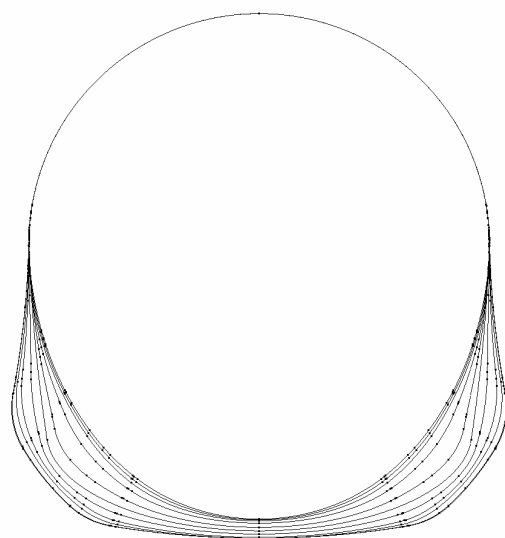
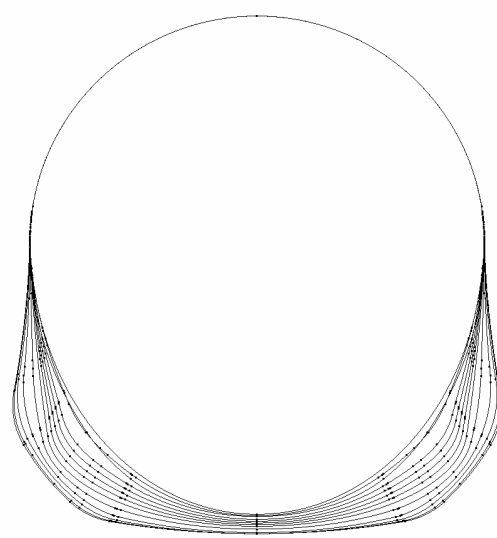


Figura 36: Contorns de l'aeronau al llarg del fuselatge (Boeing Next Generation MFEPD)

les costelles, tal i com veurem en la secció del disseny de la unió de l'ala al fuselatge. D'altra banda, a la figura 37b es pot veure la vista en alçat des de la quaderna més gran fins a l'últim esbós involucrat en aquestes modificacions.



(a) Vista en alçat des del primer esbós involucrat fins a l'esbós del contorn de la quaderna més gran



(b) Vista en alçat des de la quaderna més gran fins a l'últim esbós involucrat

Figura 37: Vista en alçat de les quadernes involucrades en la unió de l'ala i el fuselatge

Una vegada ja tenim la forma desitjada de cadascuna de les quadernes de la cabina de passatgers s'ha creat l'esbós interior de les quadernes, que com ja s'ha comentat prèviament serà de 20 mm a escala del model.

Per últim, s'ha extruït la superfície delimitada pels dos esbossos (l'exterior i l'interior) per tal de donar-li el gruix desitjat de 3 mm a les peces. A la figura 38 es poden veure les quadernes des de la 11 fins a la 56.

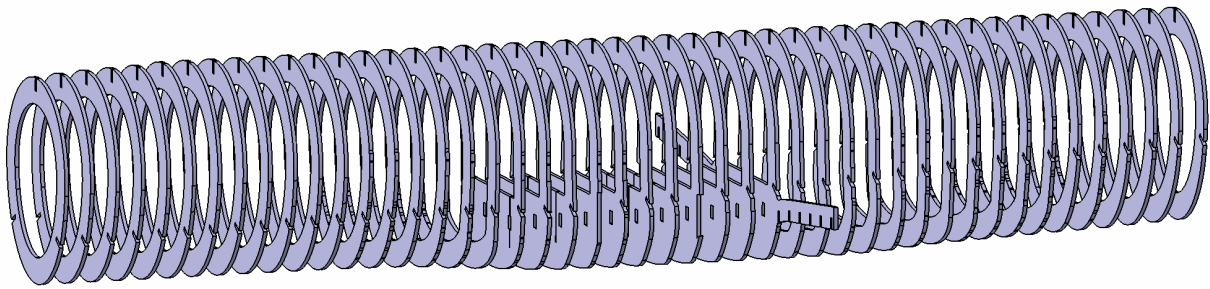


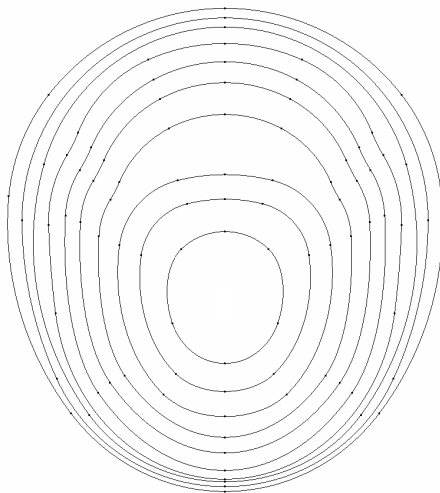
Figura 38: Quadernes de la cabina de passatgers

Com es pot observar a la figura 38 hi ha algunes quadernes que presenten modificacions. Aquests canvis s'explicaran més endavant en la secció del disseny de l'ala ja que formen part de la unió de l'ala amb el fuselatge. També es poden veure forats a la part superior i als laterals de totes les quadernes. Aquests forats són per a encaixar els tres travessers que suportaran l'estructura de les quadernes. Es veuran amb més detall les dimensions i geometria d'aquests forats en la secció del disseny dels travessers del fuselatge.

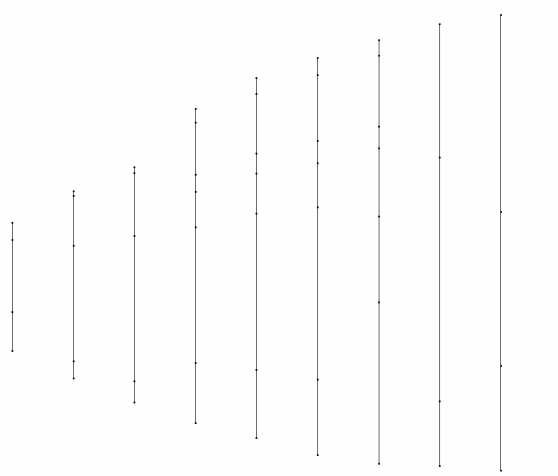
4.2.2 Disseny de la cabina de comandament

El procediment seguit per a fer la cabina de comandament és anàleg al del disseny de la cabina de passatgers. En aquest cas hem utilitzat els contorns davanters de la figura 36 que donen forma a la cabina de comandament.

Una vegada dimensionats amb la màxima precisió possible al CATIA, s'han utilitzat les vistes principals vectoritzades que vam adquirir per tal de fer els esbossos de la resta de quadernes, tal i com podem observar a la figura 39.



(a) Vista en alçat dels esbossos de la cabina de comandament



(b) Vista de perfil dels esbossos de la cabina de comandament

Figura 39: Diferents vistes dels esbossos de la cabina de comandament

Una vegada ja hem aconseguit la forma desitjada dels esbossos exteriors de la cabina, podem crear els esbossos interiors, a 20 mm a escala de model, i seguidament extruir la superfície delimitada per tots dos esbossos per donar-li el gruix desitjat de 3 mm a cadascuna de les peces, tal i com es va fer a la cabina de passatgers. A la figura 40 es poden veure les quadernes de la cabina de comandaments, que van de la 1 a la 10, una vegada fetes les extrusions.

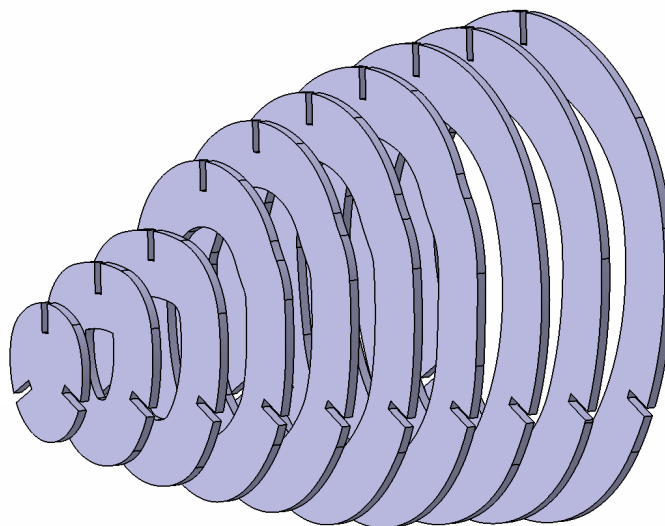


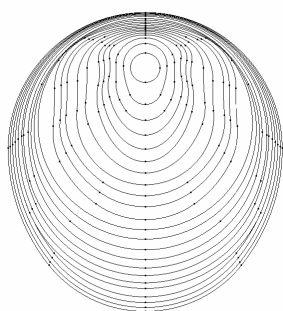
Figura 40: Quadernes de la cabina de comandaments

La primera quaderna era massa petites per a que es pogués fer un forat interior de 20 mm per tant els forats es van obviar en aquesta quaderna. Tal i com s'ha comentat a la cabina de passatgers, els forats que es poden observar a la part superior i als laterals de les quadernes es veuran amb més detall en la secció del disseny dels travessers del fuselatge.

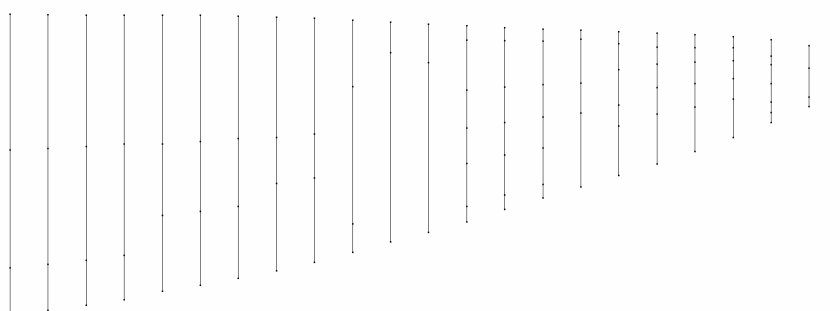
4.2.3 Disseny del con de cua

El procediment que seguirem per al disseny del con de cua serà el mateix que per a les cabines de passatgers i de comandament.

Mitjançant els contorns posteriors de la figura 36 s'han dissenyat els esbossos exteriors de les quadernes del con de cua, tal i com es poden veure a la figura 41.



(a) Vista en alçat dels esbossos del con de cua



(b) Vista de perfil dels esbossos del con de cua

Figura 41: Diferents vistes dels esbossos del con de cua

Una vegada tenim els esbossos exteriors dissenyem els interior a 20 mm a escala del model i per últim extruïm la superfície delimitada per donar el gruix de 3 mm a les peces. A la figura 42 podem veure el resultat de fer aquestes operacions en CATIA.

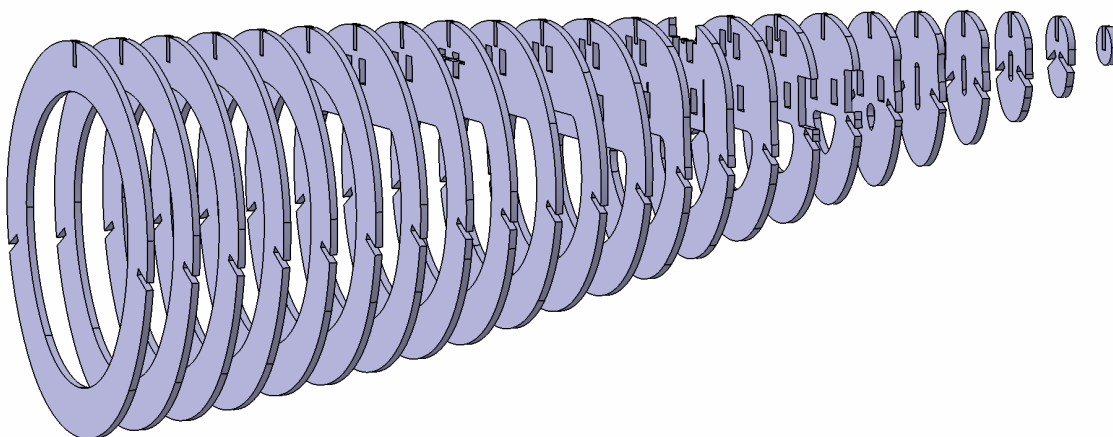


Figura 42: Quadernes del con de cua

Tal i com passava a la cabina de comandament hi ha algunes quadernes que eren massa petites per poder tenir el forat interior de 20 mm. En aquest cas les cinc últimes quadernes eren massa petites. A les quadernes 75, 76 i 77 s'ha fet un petit forat en lloc del forat que deuriem de tenir per a que tinguin major robustesa. D'altra banda, a les quadernes 78a i 79a el forat s'ha obviat perquè eren massa petites. Les modificacions que es poden observar en les quadernes centrals són degudes a la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge.

4.2.4 Disseny dels travessers del fuselatge

En aquesta secció es dissenyaran els travessers del fuselatge. Es dissenyaran tres travessers principals. Un d'aquests estarà ubicat a la part de dalt del fuselatge en el pla de simetria de l'aeronau i els altres dos estaran situats a 120° del primer. Aquests tres seran els encarregats de donar-li suport a l'estructura.

Disseny del travesser superior del fuselatge

Primer començarem explicant el disseny del travesser superior. Pel seu disseny s'ha utilitzat l'eina anomenada *Multi-Sections Surface* del mòdul *Generative Shape Design* de CATIA. Aquesta eina és capaç de crear una superfície gràcies a unir dos o més esbossos, en el nostre cas 79 esbossos que fan referència a les 79 quadernes que té el fuselatge de l'aeronau. En la figura 43 es pot veure el resultat d'aplicar la multi-secció als esbossos de les quadernes de tot el fuselatge.

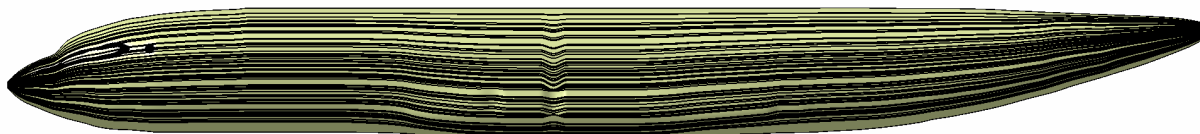


Figura 43: Multi-secció de totes les quadernes del fuselatge

Una vegada creada aquesta superfície es troba la intersecció d'aquesta amb el pla de simetria de l'aeronau per tal de trobar la corba que uneix cadascuna de les quadernes per la seva part superior. Una vegada tenim aquesta corba la definim com a la part superior del travesser que estem dissenyant. Seguidament creem la part inferior fent una còpia d'aquesta corba i desplaçant-la 20 mm (la mida de la secció radial de les quadernes). Per últim, unim els dos extrems d'aquestes corbes i extruïm la superfície delimitada. Ara ja tenim dissenyat el nostre travesser superior del fuselatge, el qual es pot veure a la figura 44.

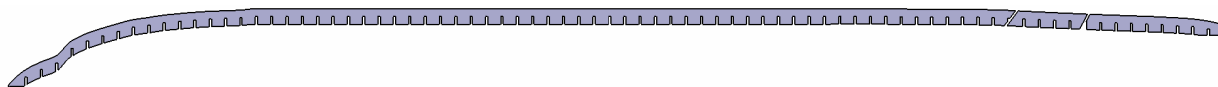


Figura 44: Travesser superior del fuselatge

Els talls situats a la cua que podem veure en la figura anterior són per a que els travessers de l'estabilitzador vertical puguin unir-se amb el fuselatge correctament. Els forats del travesser superior del fuselatge serveixen per a que pugui encaixar amb cadascuna de les quadernes, per això les quadernes del fuselatge presentaven forats similars a la part superior.

Disseny dels travessers a 120° del fuselatge

Seguidament es dissenyaran els travessers a 120°, concretament sols dissenyarem un ja que l'altre serà simètric. Partirem de la mateixa multi-secció de la figura 43 i crearem un pla inclinat a 120° respecte el pla de simetria de l'aeronau que passi just per la punta del nas de l'avió i per la punta de la cua. A continuació, intersecarem aquest pla amb la superfície de la multi-secció i definirem aquesta corba com a la part exterior del travesser que estem dissenyant. Després crearem la part interior que serà una còpia d'aquesta però desplaçada 20 mm (la mida de la secció radial de les quadernes), tal i com passava amb el travesser superior. Per últim, unirem els dos extrems i extruirem la superfície delimitada. Totes aquestes operacions donen com a resultat el travesser a 120° tal i com podem veure a la figura 45.

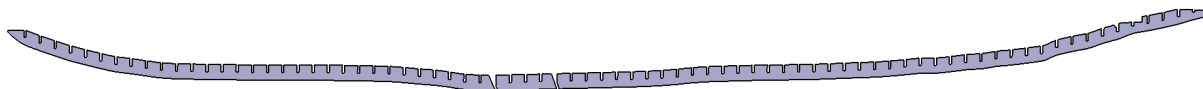


Figura 45: Travesser a 120° del fuselatge

Com podem veure a la figura anterior aquest travesser també presenta dos talls a la meitat del fuselatge. Aquests talls són per a que els travessers de l'ala puguin unir-se amb el fuselatge correctament. Al llarg de la peça podem observar els forats necessaris per a que les quadernes s'acoblen de manera correcta amb el travesser.

Una vegada tenim totes les parts del fuselatge dissenyades podem veure a la figura 46 com queden totes juntes una vegada que estan unides.

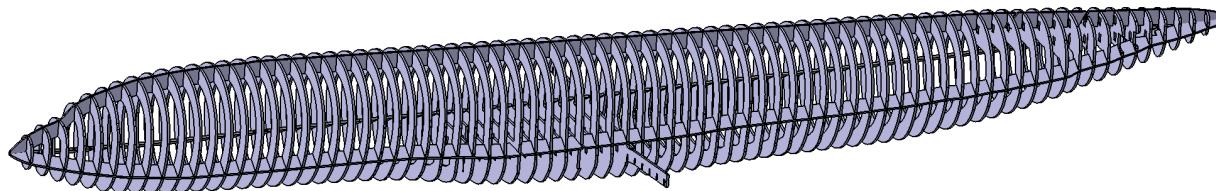


Figura 46: Disseny complet del fuselatge de l'aeronau

4.3 Disseny de l'ala

En aquest apartat s'indicarà el procediment seguit per a dissenyar les ales de l'aeronau. Sols s'explicarà el procediment d'una ja que l'altra l'obtindrem per simetria. L'ala constarà de costelles i de travessers que donaran suport a les costelles i uniran l'ala amb el fuselatge.

El primer que s'ha fet ha estat obtenir els perfils alars dels Boeing 737 Next Generation de la pàgina web *airfoiltools* ja que no estaven disponibles els dels Boeing 737 MAX [9]. Aquesta pàgina oferia un total de quatre perfils al llarg de tota l'envergadura de l'ala. Una vegada es té l'arxiu DAT (.dat) dels quatre perfils, es va utilitzar Microsoft Excel per obrir aquest arxiu DAT i passar els diferents punts dels perfils a CATIA mitjançant una MACRO d'Excel que ofereix CATIA. Una MACRO és un conjunt d'instruccions que s'executen de manera seqüencial per mitjà d'un ordre d'execució. Al passar els punts a CATIA es va seleccionar l'opció uneix els punts amb una línia. Per tant, ara ja tenim els quatre perfils posicionats correctament en CATIA. A continuació, anàlogament a com es va fer amb el fuselatge, es va crear una multi-secció que unia els esbossos dels quatre perfils. Amb aquestes operacions es va trobar la superfície de tota l'ala, com podem veure a les figures 47 i 48.

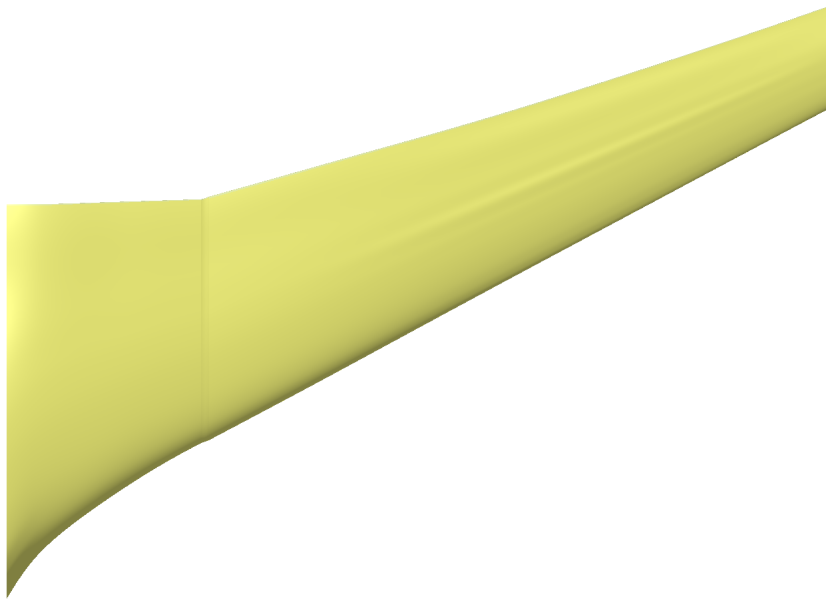


Figura 47: Vista en planta de la superfície de l'ala

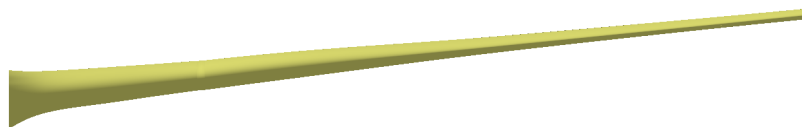


Figura 48: Vista en alçat de la superfície de l'ala

Una vegada tenim la superfície alar dissenyada ja podem passar a dissenyar els seus travessers, les costelles i la unió de l'ala amb el fuselatge.

4.3.1 Disseny dels travessers de l'ala

El diagrama de l'ala extret del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD) dels Next Generation", figura 49, va ser de gran ajuda per saber de manera aproximada quina era la posició dels travessers de les ales en les aeronaus de Boeing.

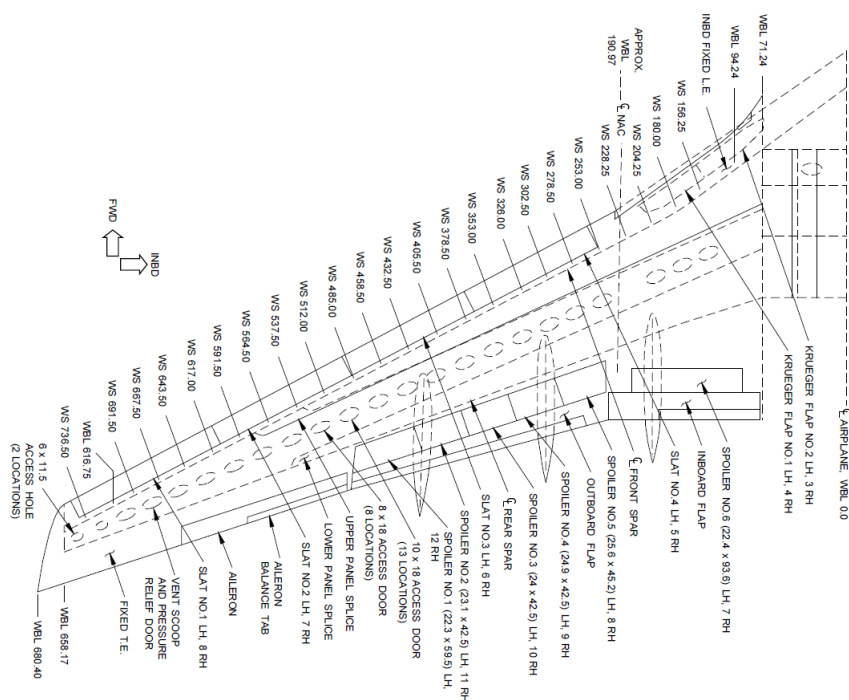


Figura 49: Diagrama de l'ala d'una aeronau Boeing

Per tant, agafant aquesta figura com a referència es va decidir que els dos travessers travessarien les costelles pel 15 i 55% de la corda. Per tant, es van crear dos plans, un per a cada travesser, que intersecaven amb la superfície alar seguint les anterior restriccions. Seguidament, es va trobar la intersecció d'aquests dos plans amb la superfície alar. Una vegada es tenia la forma que havia de seguir el travesser al llarg de l'ala es va dissenyar la unió d'aquests amb el fuselatge. Aquesta unió es veurà amb més detall a la secció del disseny de la unió de l'ala amb el fuselatge. Per últim, es van extreure els dos esbossos resultants per tal de donar-los el gruix de 3 mm que té el material en el que es tallaran les peces. En la figura 50 es pot veure el resultat d'aquestes operacions.

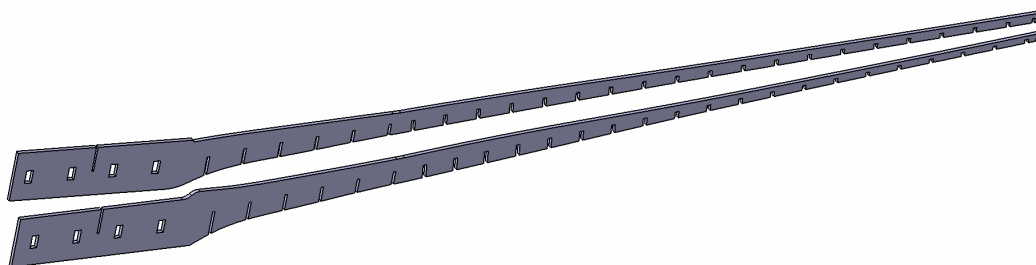


Figura 50: Travessers davanter i posterior de l'ala esquerra de l'aeronau

A l'anterior figura podem observar que els travessers presenten múltiples forats. Els forats que es troben al llarg de l'envergadura de l'ala representen les interseccions de les costelles amb els travessers i els forats que es troben dins de l'estructura del fuselatge s'utilitzaran per unir els travessers amb el fuselatge de l'aeronau i per interseccionar els travessers esquerres amb els drets.

L'única diferència entre els travessers esquerres i els drets és el forat de la intersecció entre ells ja que els travessers esquerres tenen per dalt el forat i els drets per baix per a que es puguin acoblar entre ells. Per tant, per fer els travessers de l'ala dreta es va fer una simetria dels esbossos esquerres i es va modificar la posició del forat esmentat. En la figura 51 es pot veure la intersecció entre els travessers esquerres i drets.

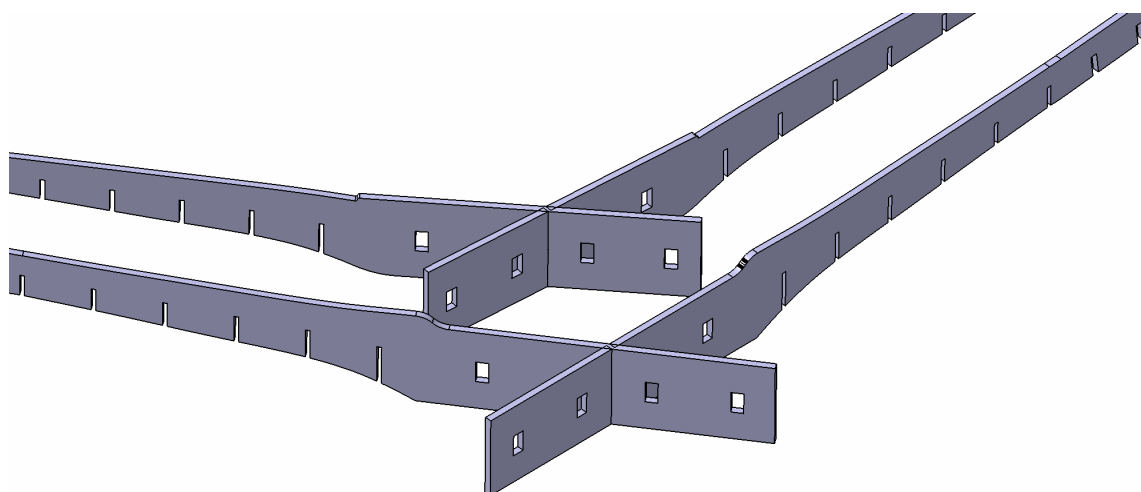


Figura 51: Intersecció entre els travessers esquerres i drets de l'ala de l'aeronau

4.3.2 Disseny de les costelles de l'ala

Per fer el disseny de les costelles, com que no es poden representar en el model a escala totes les que té un avió real, s'han posat les màximes possibles. Per fer-ho, s'ha tingut en compte quin pes podien suportar els travessers del model de l'aeronau. Una vegada s'ha estimat el pes, s'ha pogut calcular quantes costelles es dissenyaran i de quina manera estaran distribuïdes. Després de fer les estimacions s'ha decidit que hi haurà 6 costelles paral·leles al fuselatge separades entre elles una distància de 2.56 cm i 20 costelles perpendiculars al travesser davanter separades una distància de 2.44 cm. Totes les decisions que s'han pres per fer el disseny de les costelles han estat les més apropiades per a que el disseny de l'ala fos el més aproximat possible a la realitat.

Per tant, tenint en compte les consideracions anteriors s'han creat una sèrie de plans al llarg de l'ala i s'han intersecat amb la superfície alar per trobar la forma exacta de les costelles. En la figura 52 podem veure els contorns resultants de la intersecció dels diferents plans amb la superfície alar.

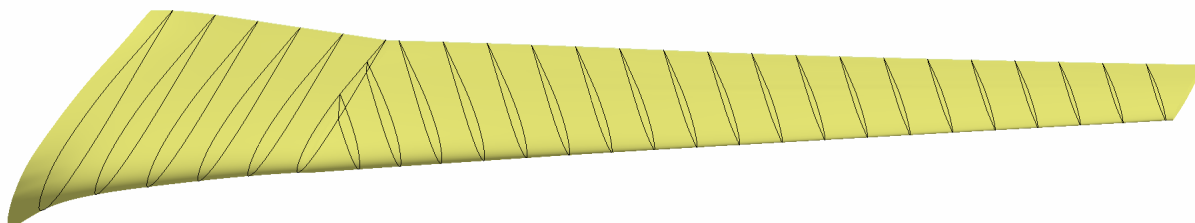


Figura 52: Contorn de les costelles de l'ala de l'aeronau

Com podem veure a la figura, les primeres dues costelles perpendiculars al travesser davanter s'han dissenyat de tal forma que es tallen amb l'última costella paral·lela al fuselatge. Per motius de distribució d'espai aquesta ha estat la millor solució trobada per evitar el problema del canvi d'inclinació de les costelles.

Una vegada tenim els contorns de les costelles els extruïm per tal de donar-los el gruix de 3 mm fixat pel material del model. El resultat d'aquesta operació es pot veure a la següent figura 53.

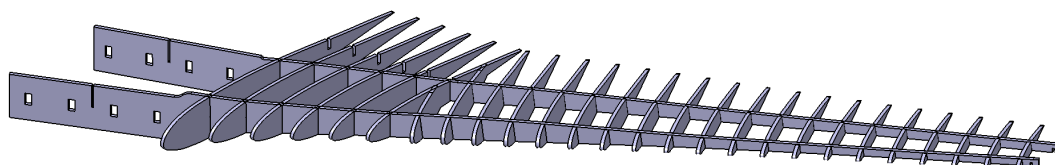


Figura 53: Costelles de l'ala esquerra de l'aeronau acoblades als travessers

Per crear les costelles de l'ala dreta s'ha fet una simetria de les de l'ala esquerra. A continuació, es mostra a la figura 54 la vista en planta tant de les costelles com dels travessers esquerres i drets.

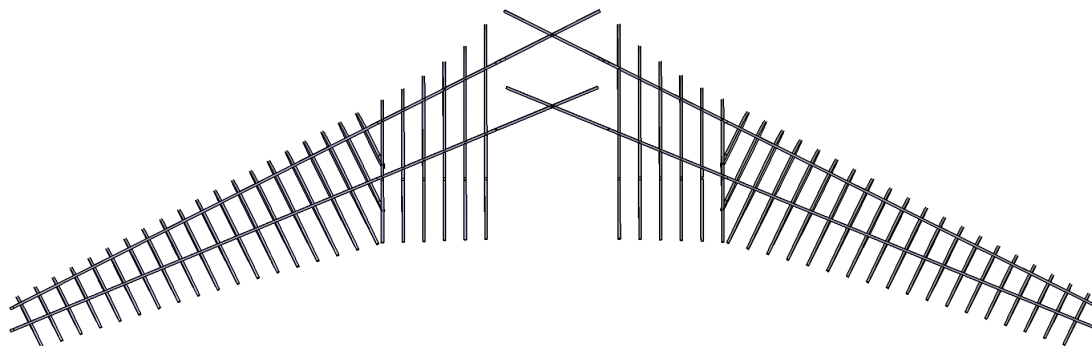


Figura 54: Vista en planta de les costelles i travessers de les ales de l'aeronau

4.3.3 Disseny dels winglets

En aquest apartat es dissenyaran els winglets tipus Scimitar de l'aeronau. Per dur a terme el disseny ens hem ajudat de les vistes principals que es van adquirir i de diverses imatges reals dels winglets del Boeing 737-800 MAX.

El procés seguit ha estat el següent: primer s'han fet els esbossos de les aletes superior i inferior del winglet seguint les dimensions que es van trobar al realitzar l'estudi de l'estructura i amb l'ajuda de les imatges dels winglets d'un Boeing 737-800 MAX real, després s'han extruït els esbossos per donar-li el gruix del material i per últim s'han realitzat uns forats interns per buidar el winglet i que el seu pes no provoqui un gran esforç a la punta dels travessers. A la figura 55 es pot veure el disseny final dels winglets de l'aeronau.

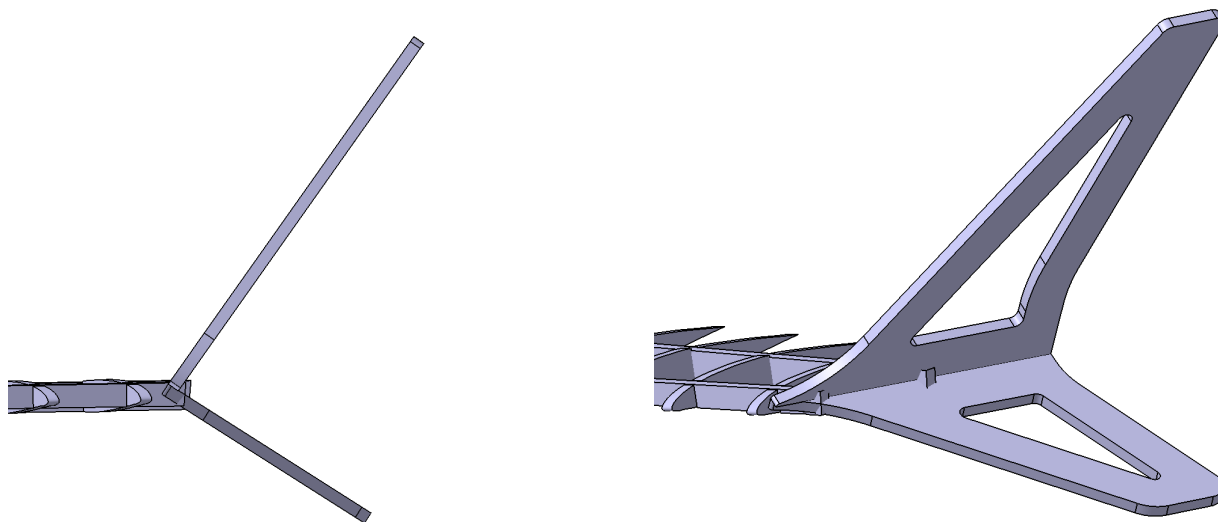


Figura 55: Diferents vistes del disseny dels winglets de l'aeronau

4.3.4 Disseny de la unió de l'ala amb el fuselatge

Per unir l'ala amb el fuselatge s'han utilitzat unes bigues que uniran els travessers de les ales amb les quadernes del fuselatge. Aquestes bigues travessaran els travessers en direcció paral·lela al fuselatge i intersecaran amb les quadernes per tal de donar-li a la unió la robustesa necessària. Aquesta unió simularà la caixa alar (wing box) que uneix l'ala al fuselatge en les aeronaus reals. A la figura 56 podem veure com serà la unió de l'ala amb el fuselatge. Per a que es vegi millor el resultat s'han ocultat les costelles de l'ala. La quaderna que es veu a la figura és la quaderna encarregada de donar un millor suport a les costelles més gran i de proporcionar estabilitat i robustesa a l'estructura de

l'ala. Com podem observar, aquesta quaderna també presenta diversos forats per on s'acoblaran les diferents costelles paral·leles al fuselatge i els tres travessers del fuselatge.

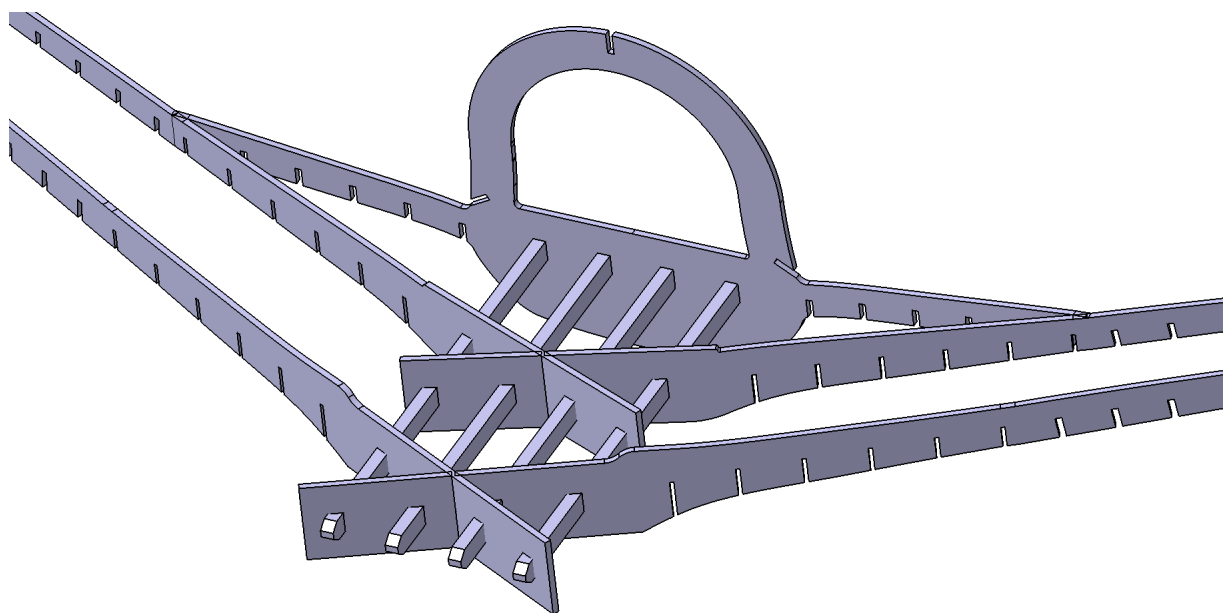


Figura 56: Unió de l'ala amb el fuselatge sense costelles ni quadernes

A continuació, incorporarem les quadernes afectades per a veure les modificacions que han sofrit per tal de deixar passar els travessers de les ales a través d'elles. En les figures 57 i 58 es pot veure el resultat de les modificacions comentades anteriorment.

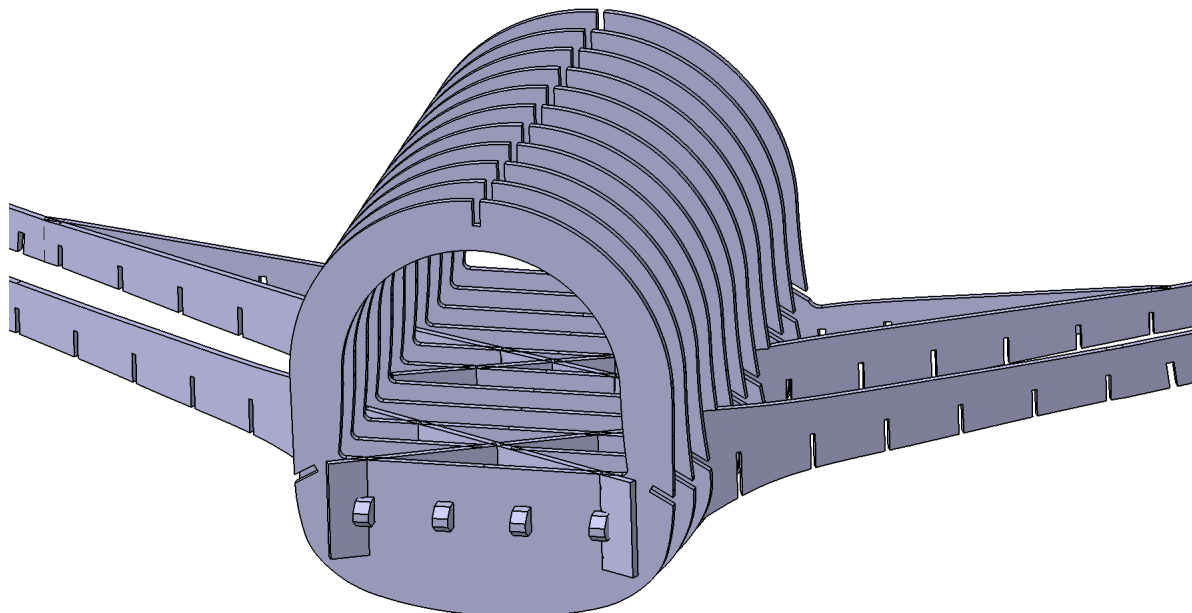


Figura 57: Unió de l'ala amb el fuselatge

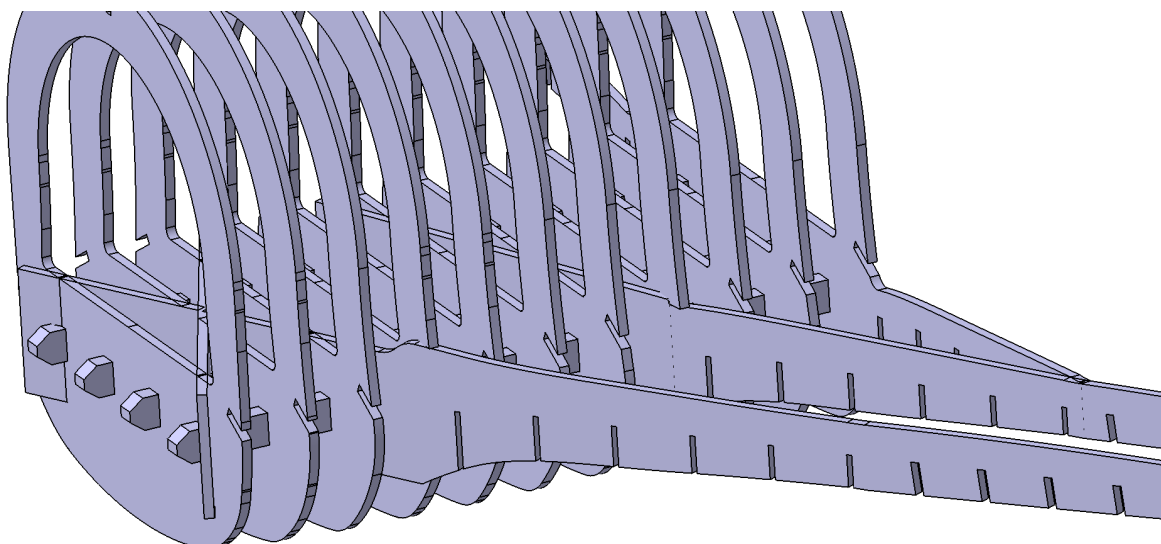
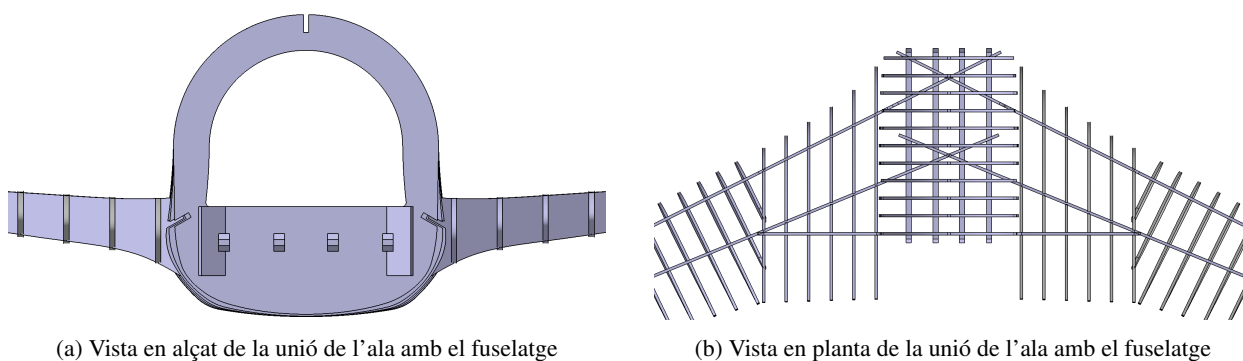


Figura 58: Vista en detall de la intersecció dels travessers i les quadernes en la unió de l'ala amb el fuselatge

Per últim, en la figura 59 es mostren les vistes en alçat i en planta d'aquesta unió una vegada incorporades les costelles afectades. En la figura 59a es pot comprovar que s'ha respectat l'altura de l'habitacle dels passatgers. Aquest habitacle té una altura mitjana de 2,18 m i el nostre disseny té una mida de 2,19 m.



(a) Vista en alçat de la unió de l'ala amb el fuselatge

(b) Vista en planta de la unió de l'ala amb el fuselatge

Figura 59: Diferents vistes de la unió de l'ala amb el fuselatge

4.4 Disseny de l'estabilitzador horitzontal

El procés per dissenyar l'estabilitzador horitzontal és molt similar al de l'ala. L'estabilitzador horitzontal constarà de quatre travessers (dos esquerres i dos drets) principals i de costelles que donen la forma dels perfils aerodinàmics.

Per dissenyar l'estabilitzador horitzontal el primer que es va fer va ser obtindre el perfil de l'estabilitzador. Com no es va poder aconseguir el arxiu DAT (.dat) es va crear el perfil amb ajuda del programa XFLR5 gràcies a una imatge del perfil extreta del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD)" de Boeing. Per tant, com podem veure a la figura 60 es va crear el perfil a mà seguint el contorn de la imatge.

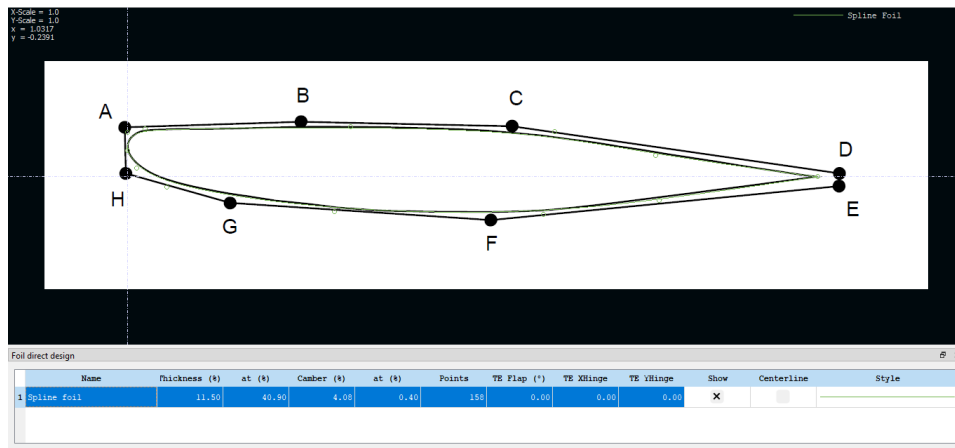


Figura 60: Creació del perfil de l'estabilitzador horitzontal en XFLR5

Ara que ja està creat el perfil, els diferents punts es van enviar a CATIA mitjançant l'arxiu DAT del perfil i la MACRO de Microsoft Excel dissenyada per CATIA, tal i com es va procedir en el disseny de l'ala.

Seguidament, es va crear una multi-secció utilitzant dos perfils com el dissenyat a mà. El primer es va escalar per a que tingués la mida de l'estabilitzador a l'arrel i el segon la mida a la punta. La multi-secció resultant representa la superfície de l'estabilitzador horitzontal, la podem veure a la figura 61.

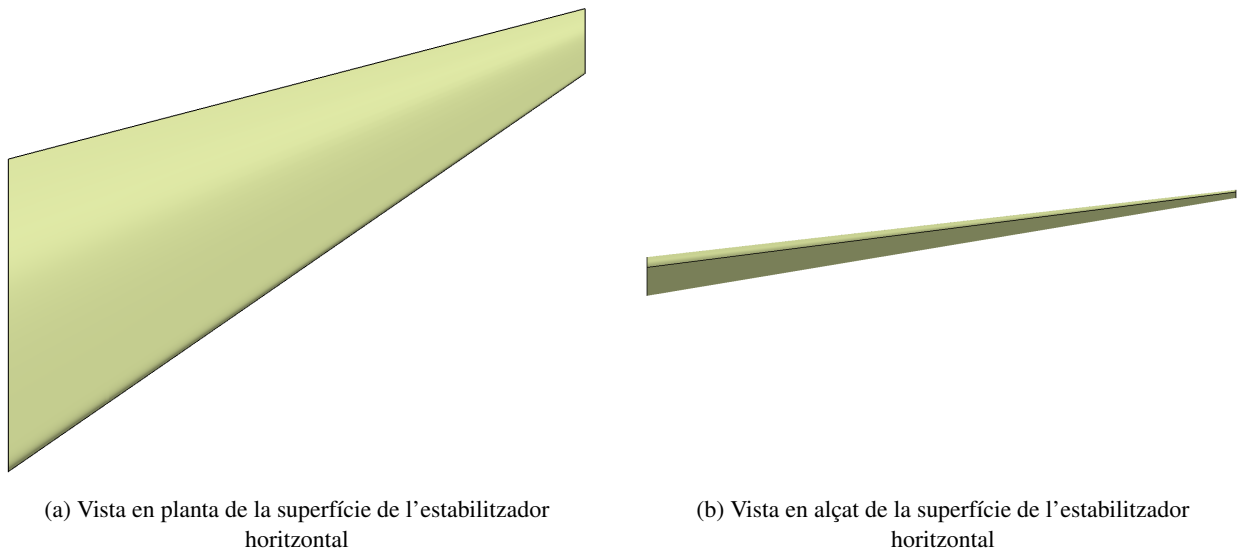


Figura 61: Diferents vistes de la superfície de l'estabilitzador horitzontal

4.4.1 Disseny dels travessers de l'estabilitzador horitzontal

Per dissenyar els travessers va ser de gran ajuda la figura 62 extreta del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD)" dels Boeing Next Generation la qual ens va donar una idea aproximada de la distribució dels travessers en l'estructura de l'estabilitzador horitzontal.

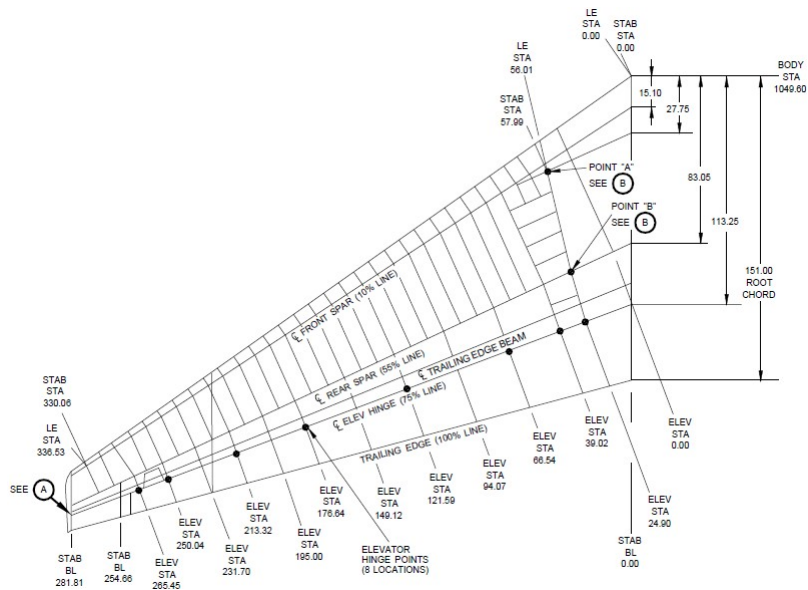


Figura 62: Diagrama de l'estabilitzador horitzontal d'una aeronau Boeing

Una vegada estudiada la posició dels dos travessers es va decidir que travessarien les costelles de l'estabilitzador a un 15 i un 55% de la corda. A continuació, es van crear dos plans que complien aquestes restriccions i es van interseccar amb la superfície de l'estabilitzador. Una vegada es tenia el contorn dels travessers es va dissenyar la seva unió amb el fuselatge. A diferència de les ales, aquests sols disposaran de dues bigues per suportar-los ja que el seu pes i el moment que generaran serà menor. Aquesta unió es veurà amb més detall a la secció del disseny de la unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge. En la figura 63 podem veure el disseny dels travessers després de les operacions esmentades prèviament i després d'assignar-los el gruix corresponent.

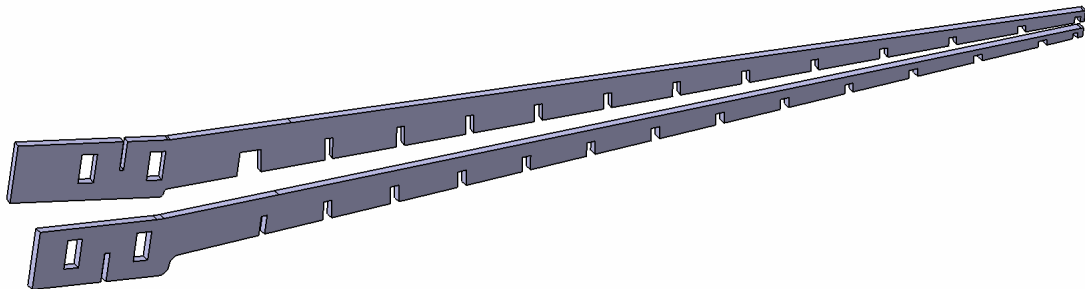


Figura 63: Travessers esquerres davant i posterior de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau

Anàlogament als travessers de les ales, podem veure com els travessers de l'estabilitzador horitzontal presenten diversos forats per al correcte acoblament amb les costelles.

Per a crear els travessers drets es farà una simetria respecte del pla de simetria de l'aeronau i es modificarà el forat de la intersecció entre els travessers drets i esquerres per a que aquests s'acoblen correctament entre ells. En la següent figura 64 es pot observar la intersecció dels travessers esquerres i drets.

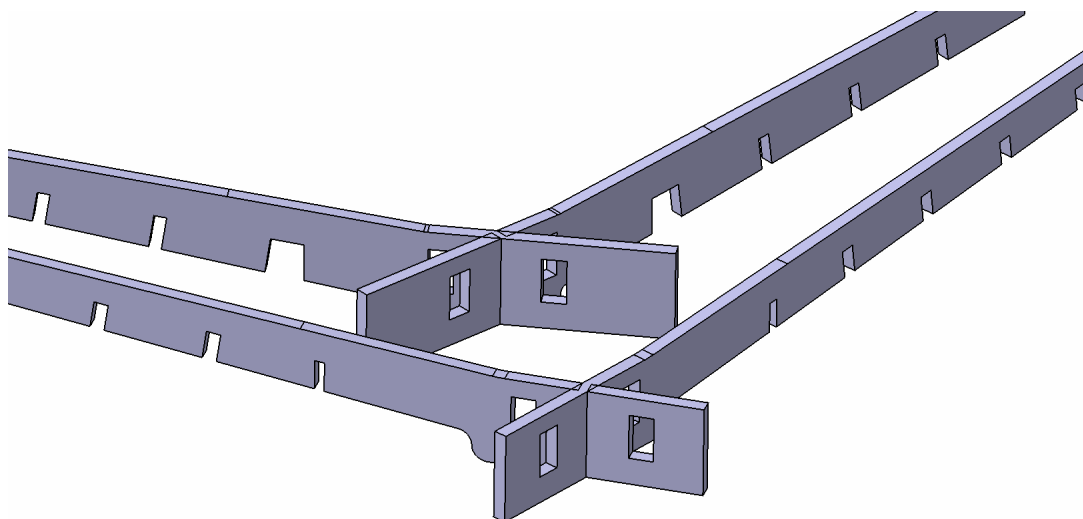


Figura 64: Intersecció entre els travessers esquerres i drets de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau

4.4.2 Disseny de les costelles de l'estabilitzador horitzontal

Tal i com passava en el disseny de les costelles de l'ala, no és possible representar totes les costelles de les que consta una aeronau real. Per tant, s'han col·locat les màximes possibles. Per fer-ho, s'ha estimat quin pes podien suportar els travessers i s'ha decidit que l'estabilitzador horitzontal constarà d'una costella paral·lela al fuselatge, de 12 costelles perpendiculars al travesser davanter separades entre elles una distància de 2,29 cm i d'una costella a la punta.

Tenint en compte els requisits anteriors s'han creat una sèrie de plans al llarg de l'estabilitzador i s'han intersecat amb la seva superfície. A la figura 65 es pot veure el contorn resultant d'aquesta intersecció.

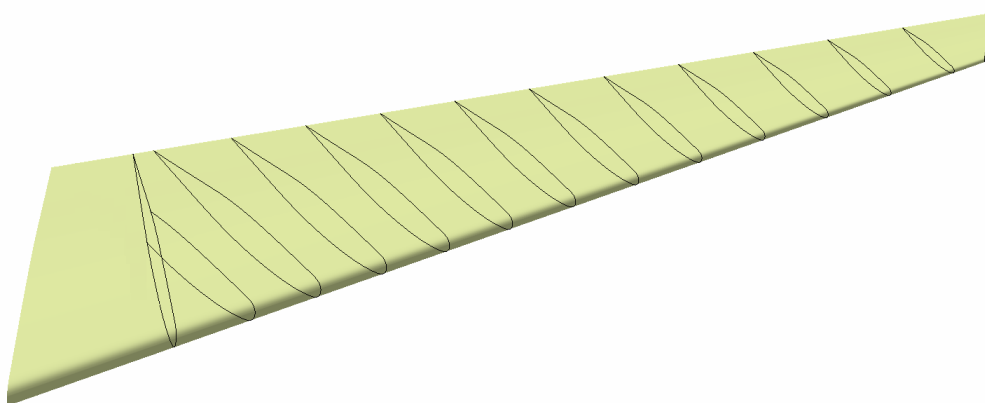


Figura 65: Contorn de les costelles de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau

Com podem veure a la figura, la segona costella es talla al contactar amb la primera. Tal i com passava al disseny de les costelles de l'ala aquesta ha estat la millor distribució d'espai trobada per evitar el problema del canvi d'inclinació de les costelles. La primera costella s'ha creat en diferent inclinació que la resta per a que segueixi la forma del fuselatge.

Una vegada tenim els contorns de les costelles els extruïm per donar-los el gruix de 3 mm. El resultat d'aquesta operació es pot veure a la figura 66.

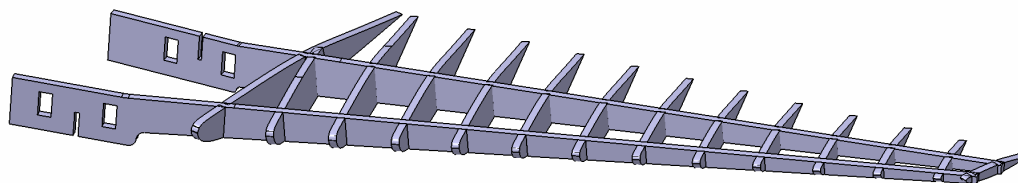


Figura 66: Costelles de l'estabilitzador horitzontal esquerre de l'aeronau acoblades als travessers

Per últim, mitjançant una simetria de les costelles esquerres s'han creat les costelles dretes de l'estabilitzador horitzontal. A la figura 67 es mostra la vista en planta de les totes les costelles de l'estabilitzador horitzontal acoblades als travessers.

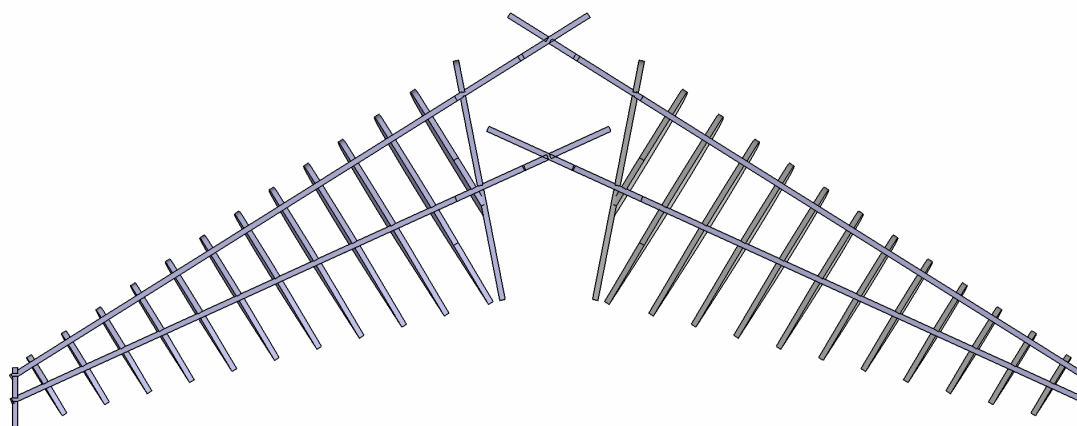


Figura 67: Vista en planta de les costelles i travessers de l'estabilitzador horitzontal de l'aeronau

4.4.3 Disseny de la unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge

Per a unir l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge s'utilitzaran dues bigues. Aquestes bigues s'encarregaran d'unir els travessers de l'estabilitzador a les quadernes del fuselatge com també succeïa de forma similar a la unió de l'ala amb el fuselatge. A la figura 68 es pot veure aquesta unió. Per veure-la amb més claredat s'han ocultat les costelles i les quadernes afectades.

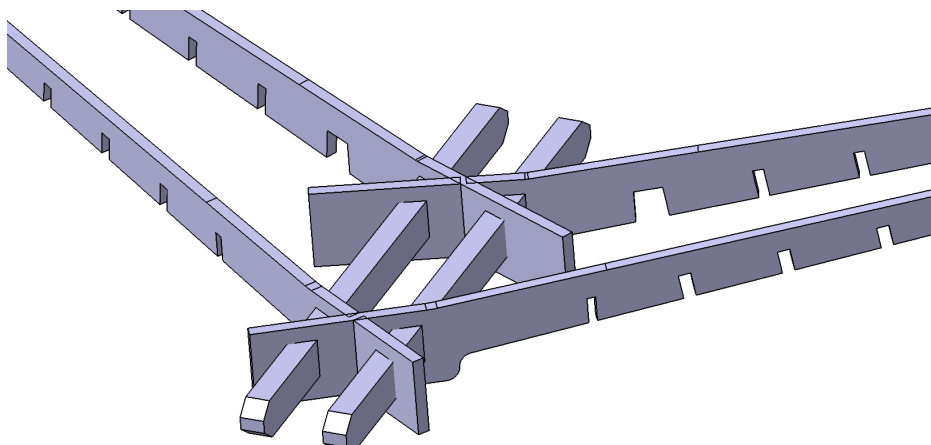


Figura 68: Unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge sense costelles ni quadernes

A continuació, s'incorporen les quadernes afectades per veure les modificacions que han sofrit per tal de no interferir en la trajectòria dels travessers. En la figura 69 podem veure els diversos forats de les quadernes deguts a les modificacions comentades prèviament.

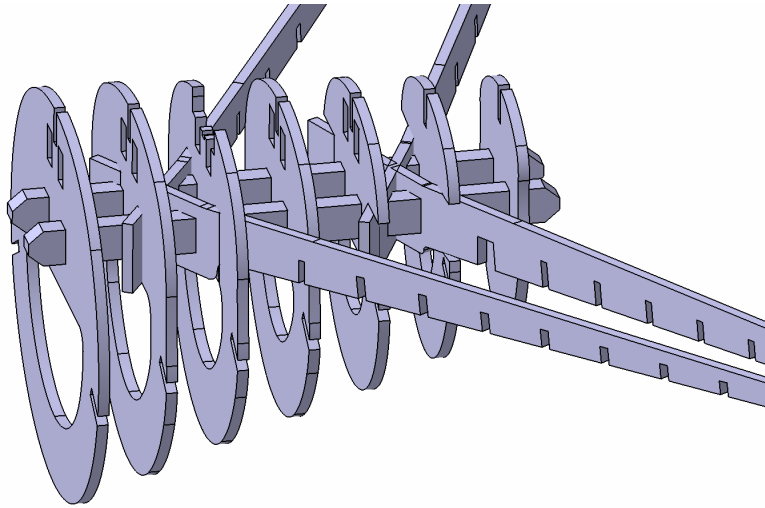


Figura 69: Unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge

Per últim, en les figures 70 i 71 es poden veure les vistes en planta i en alçat de la unió de l'estabilitzador horitzontal amb el fuselatge. En aquest cas s'han tornat a incorporar les costelles per a tenir una visió de tot el conjunt.

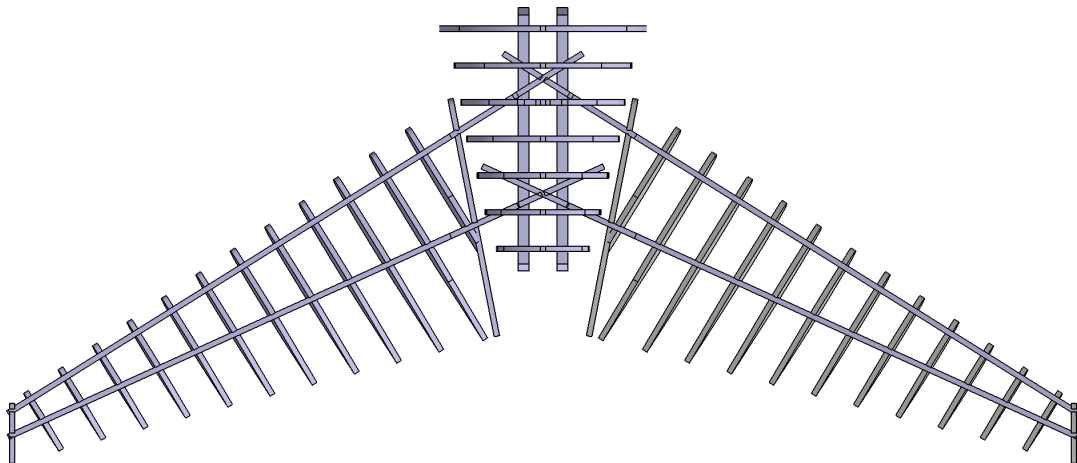


Figura 70: Vista en planta de l'estabilitzador horitzontal

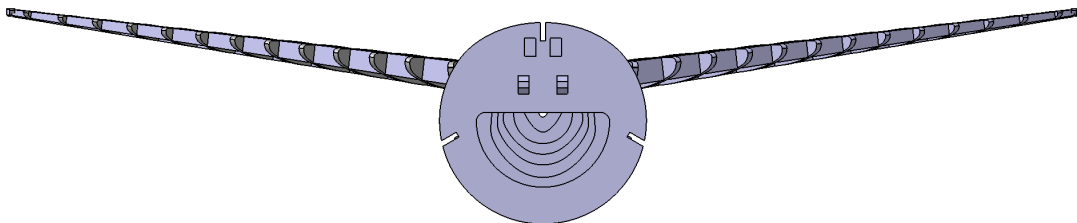


Figura 71: Vista en alçat de l'estabilitzador horitzontal

4.5 Disseny de l'estabilitzador vertical

El disseny de l'estabilitzador vertical presenta múltiples similituds amb els dissenys de les ales i de l'estabilitzador horitzontal. L'estabilitzador vertical constarà de dos travessers principals i de diverses costelles que li donen la forma correcta.

Per començar amb el disseny trobarem els diferents perfils que definiran la forma de l'estabilitzador vertical. Per crear el perfil ens vam ajudar del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD)" de Boeing ja que, anàlogament a l'estabilitzador horitzontal, no es van poder aconseguir els arxius DAT (.dat) de l'estabilitzador vertical. Aquest document oferia els tres perfils habituals les aeronaus Boeing repartits al llarg de l'envergadura de l'estabilitzador vertical. El primer d'aquests era el perfil de l'arrel, el segon era el perfil a mitjana altura i l'últim el perfil de la punta de l'estabilitzador vertical. Aquests perfils es van crear a mà amb el programa XFLR5 seguint el contorn que oferia el document. En la figura 72 es poden veure els perfils creats en l'XFLR5.

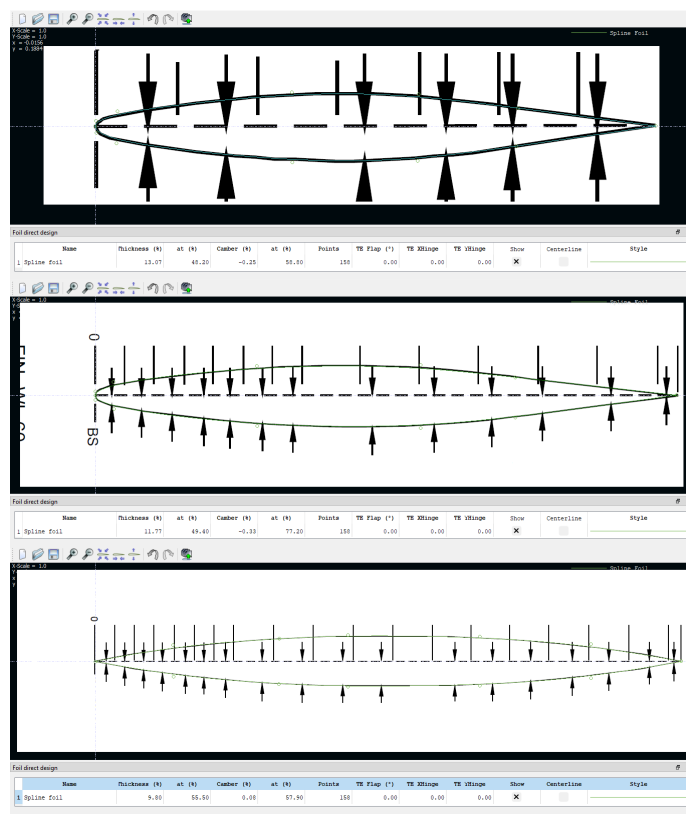
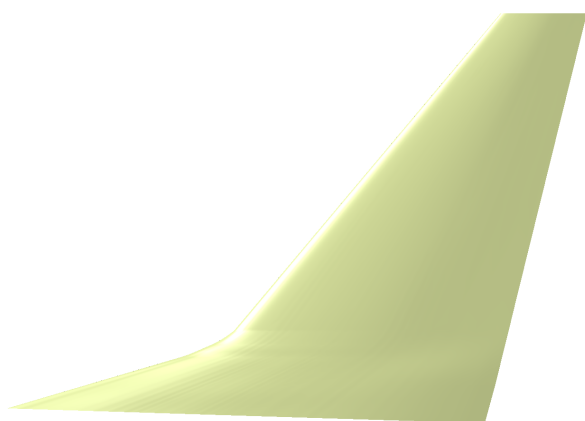


Figura 72: Creació dels perfils de l'estabilitzador vertical en XFLR5

Una vegada creats els perfils amb l'XFLR5 es van descarregar els seus arxius DAT i es van passar a CATIA els punts que definien la forma dels perfils fent servir la MACRO d'Excel que ofereix CATIA. Seguidament, amb els tres perfils ben posicionats es va crear una multi-secció i es va trobar la superfície de l'estabilitzador vertical tal i com es pot veure a la figura 73.



(a) Vista de perfil de la superfície de l'estabilitzador vertical



(b) Vista en alçat de la superfície de l'estabilitzador vertical

Figura 73: Diferents vistes de la superfície de l'estabilitzador vertical

4.5.1 Disseny dels travessers de l'estabilitzador vertical

Pel disseny dels travessers de l'estabilitzador vertical es va extreure del "Document de Planificació d'Instal·lacions i Manteniment (MFEPD)" el diagrama de l'estructura d'un estabilitzador vertical de les aeronaus Boeing. Aquest diagrama es pot veure a la figura 74.

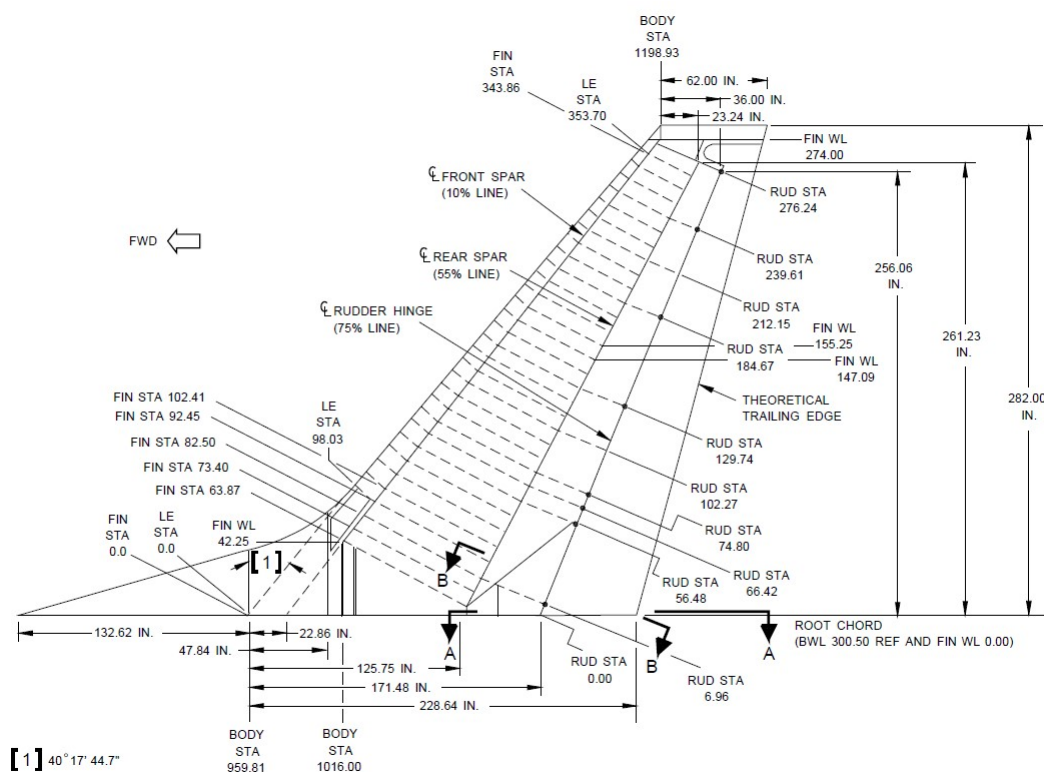


Figura 74: Diagrama de l'estabilitzador vertical d'una aeronau Boeing

Per tant, després d'estudiar la posició dels travessers al diagrama es va considerar que aquests travessarien les costelles superiors, les que no estan afectades per la gran curvatura a la part davantera i inferior, a un 15 i un 55% de la corda. Gràcies a aquesta condició podem definir la posició dels travessers. Aleshores, una vegada posicionats, es van crear els dos plans que complien aquestes condicions i, seguidament, es van intersecar amb la superfície de l'estabilitzador vertical per trobar el contorn dels dos travessers. A continuació, es va dissenyar la unió d'aquests amb el fuselatge.

Aquesta part es detallara en la secció del disseny de la unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge. A la figura 75 podem veure el resultat d'extruir 3 mm les superfícies obtingudes anteriorment.

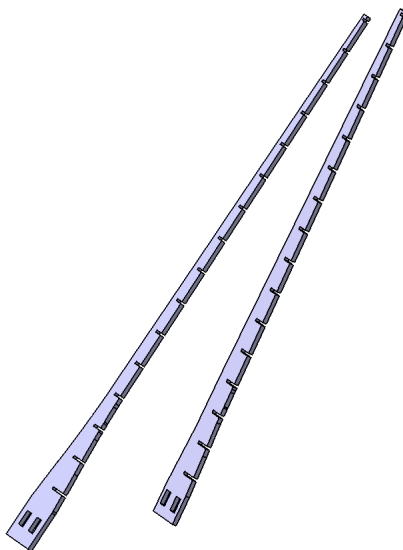


Figura 75: Travessers davanter i posterior de l'estabilitzador vertical de l'aeronau

Es pot observar que els travessers presenten diversos forats deguts a la intersecció entre els travessers i les costelles. Gràcies als forats les costelles es podran acoblar als travessers.

4.5.2 Disseny de les costelles de l'estabilitzador vertical

Anàlogament als dissenys de l'ala i de l'estabilitzador horitzontal, no és possible representar en un model a escala totes les costelles de les que consta un estabilitzador vertical d'una aeronau real. Per tant, després d'analitzar quantes costelles seria possible incorporar al disseny, s'ha decidit que l'estabilitzador vertical constarà de 15 costelles separades entre si una distància de 1.96 cm i d'una costella a la punta.

Una vegada decidit el nombre de costelles s'han creat els plans de cadascuna i, seguidament, s'han intersecat amb la superfície de l'estabilitzador vertical per trobar el contorn de cadascuna de les costelles. A la figura 76 es pot veure el resultat d'aquesta intersecció.

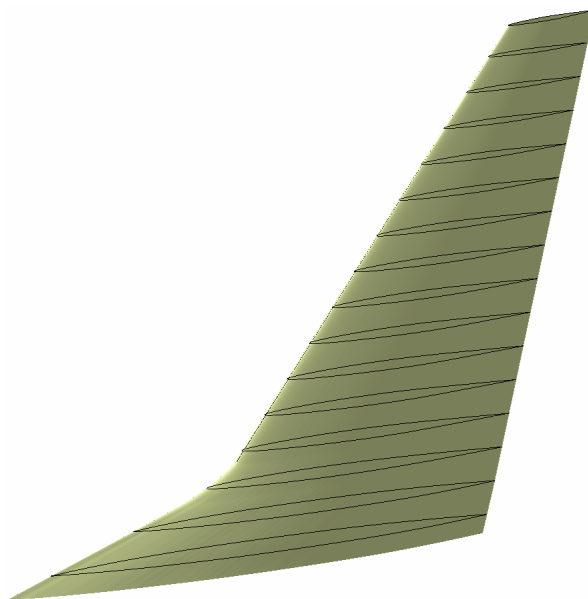


Figura 76: Contorn de les costelles de l'estabilitzador vertical de l'aeronau

Encara que no es pot apreciar a la figura, el contorn de la costella de la punta no és paral·lel a la resta de costelles. Això es degut a que la inclinació de l'última costella s'ha modificat per a que segueixi millor la forma real de l'estabilitzador vertical.

A continuació, en la figura 77 podem veure les costelles de l'estabilitzador vertical com a resultat d'haver-li aplicat un gruix als contorns trobats anteriorment.

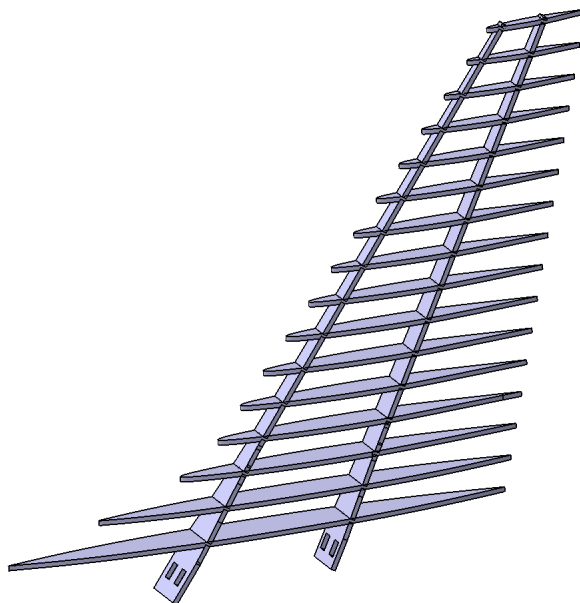


Figura 77: Costelles de l'estabilitzador vertical de l'aeronau acoblades als travessers

4.5.3 Disseny de la unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge

Per a unir l'estabilitzador vertical al fuselatge s'utilitzaran dues bigues de forma similar a la unió de l'estabilitzador horitzontal. Aquestes bigues estaran per sobre de les bigues de l'estabilitzador horitzontal i seran les encarregades de mantenir l'estabilitzador vertical en la posició correcta. Les bigues travessaran els travessers de l'estabilitzador vertical i les quadernes del fuselatge. A la figura 78 es pot veure aquesta unió entre els travessers i les bigues.

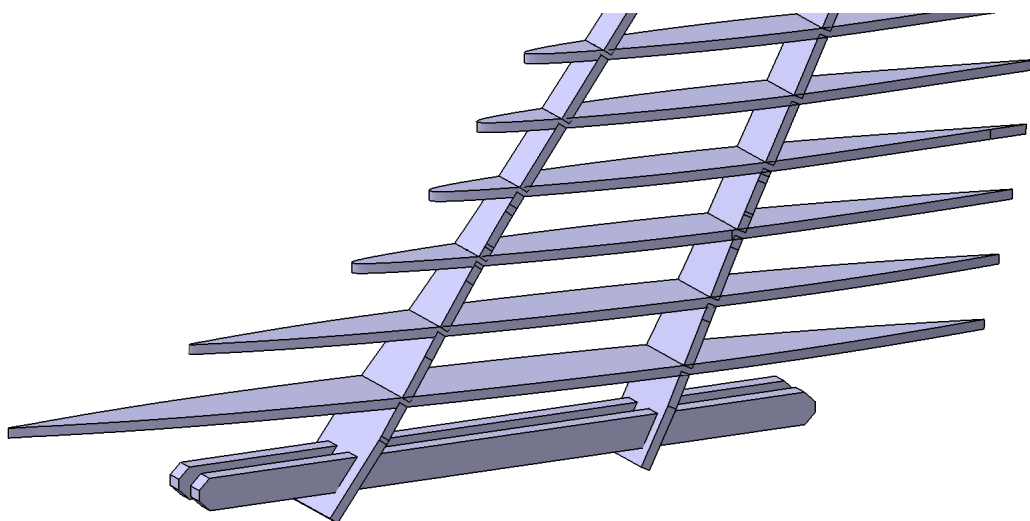


Figura 78: Unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge sense les quadernes afectades

Seguidament, es mostra la unió amb les quadernes afectades per veure les modificacions que han sofrit per tal de no interferir en la trajectòria dels travessers. En aquesta figura 79 s'han ocultat les costelles per a que es pugui apreciar

millor la intersecció dels travessers amb les quadernes i les bigues. També es pot veure que algunes quadernes que suporten l'estabilitzador vertical coincideixen amb unes quadernes que suportaven l'estabilitzador horitzontal degut a la seva proximitat. Aquest fet ha provocat que el disseny de la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge fos una de les parts més complicades del disseny de l'aeronau.

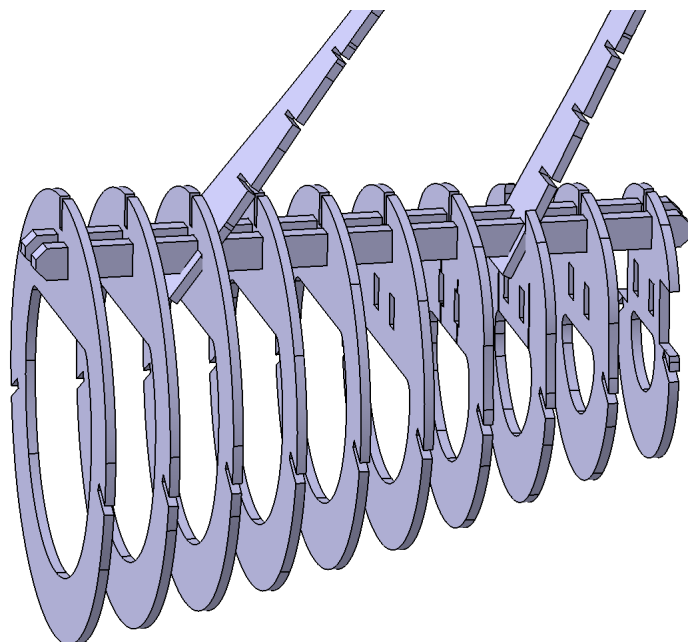
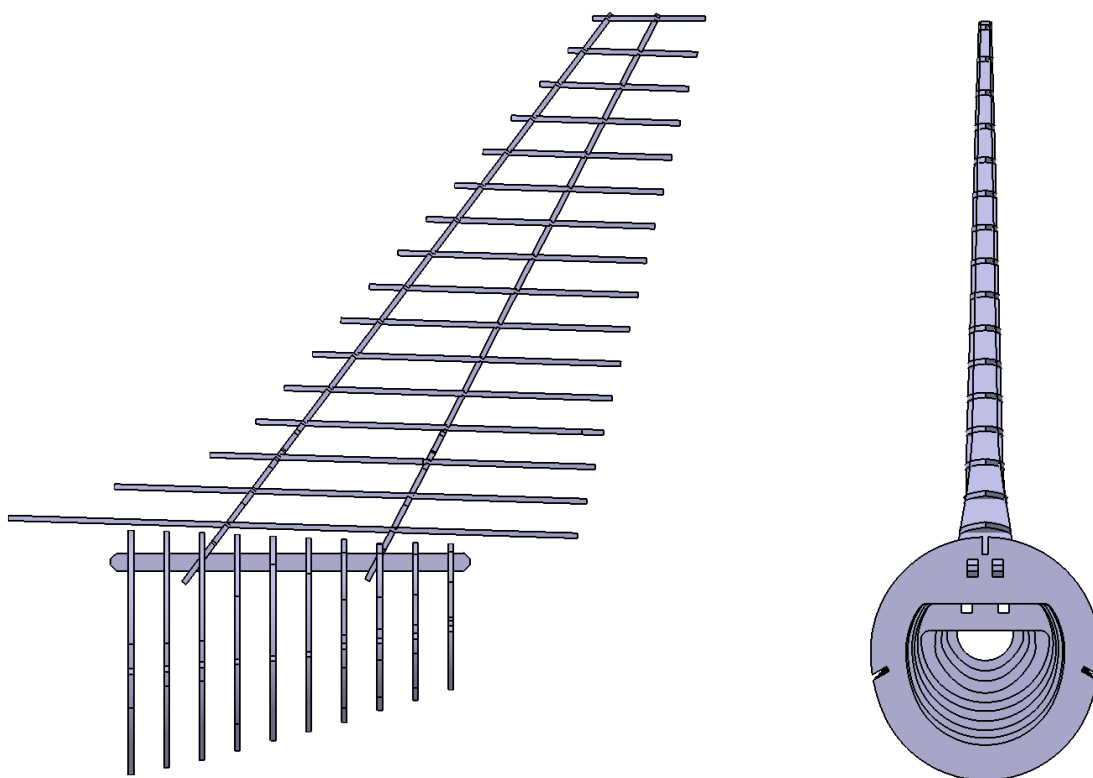


Figura 79: Unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge

Per últim, en la figura 80 es poden observar les vistes en alçat i de perfil de la unió de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge, amb les costelles un altre cop visibles.



(a) Vista de perfil de l'estabilitzador vertical

(b) Vista en alçat de l'estabilitzador vertical

Figura 80: Diferents vistes de la intersecció de l'estabilitzador vertical amb el fuselatge

4.6 Vistes del disseny de l'aeronau

Una vegada hem dissenyat cadascuna de les parts de l'aeronau les acoblarem entre si per a poder veure el disseny complet del Boeing 737-800 MAX. En les següents figures es mostren les principals vistes del disseny de l'aeronau.

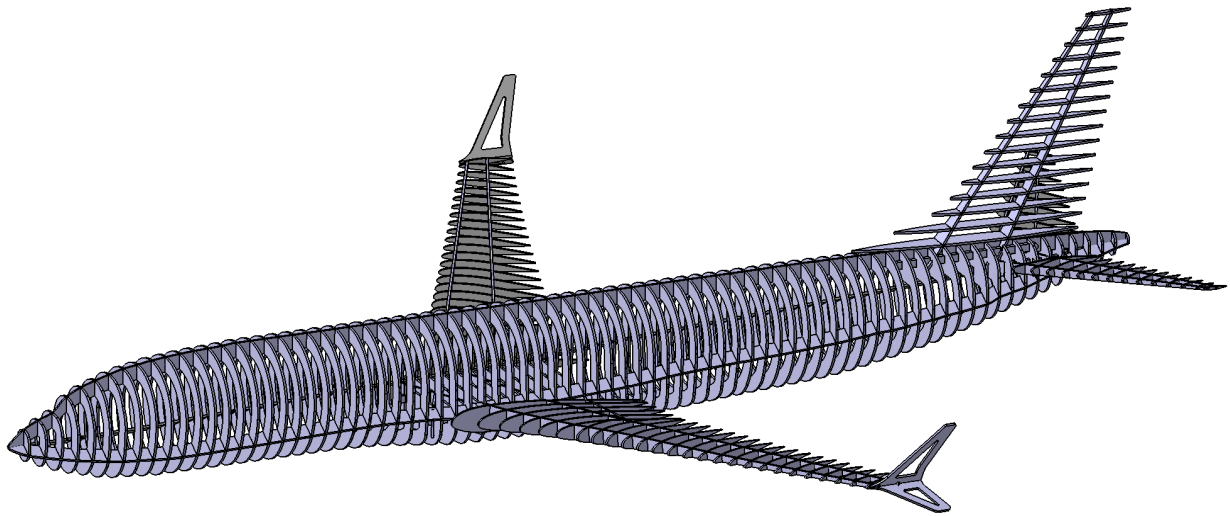


Figura 81: Vista 3D del disseny del Boeing 737-800 MAX

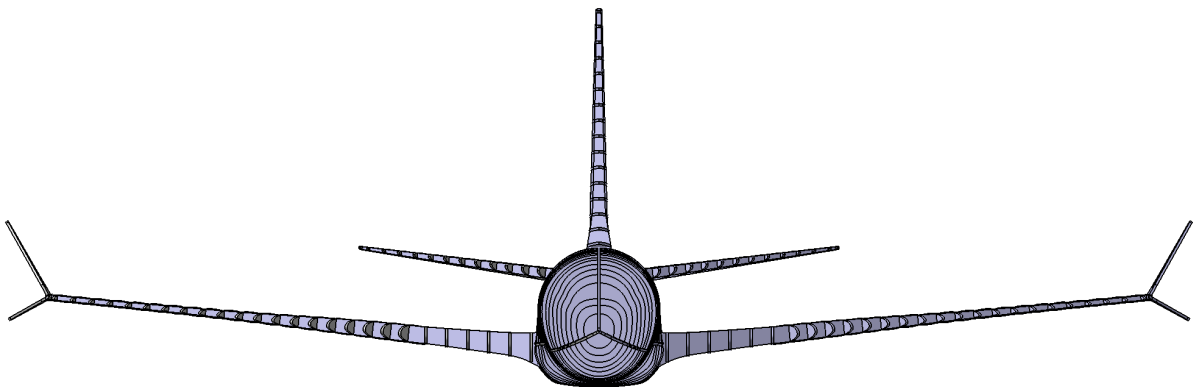


Figura 82: Vista en alçat del disseny del Boeing 737-800 MAX

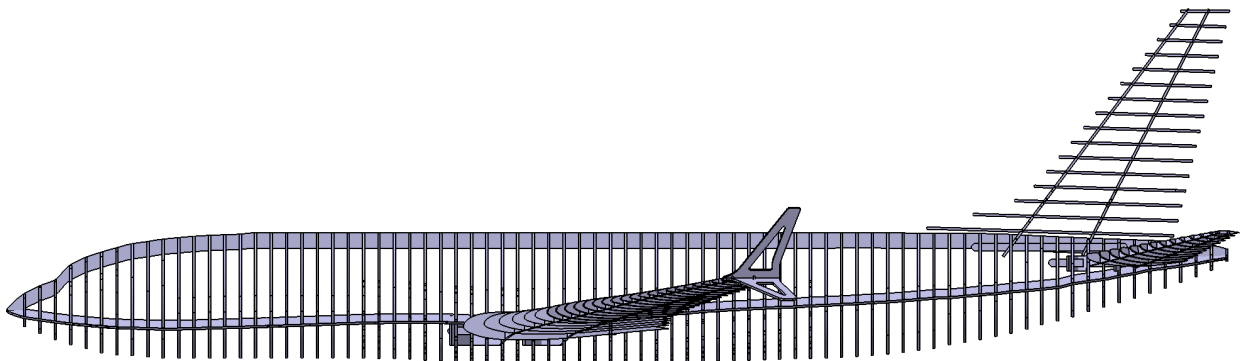


Figura 83: Vista de perfil del disseny del Boeing 737-800 MAX

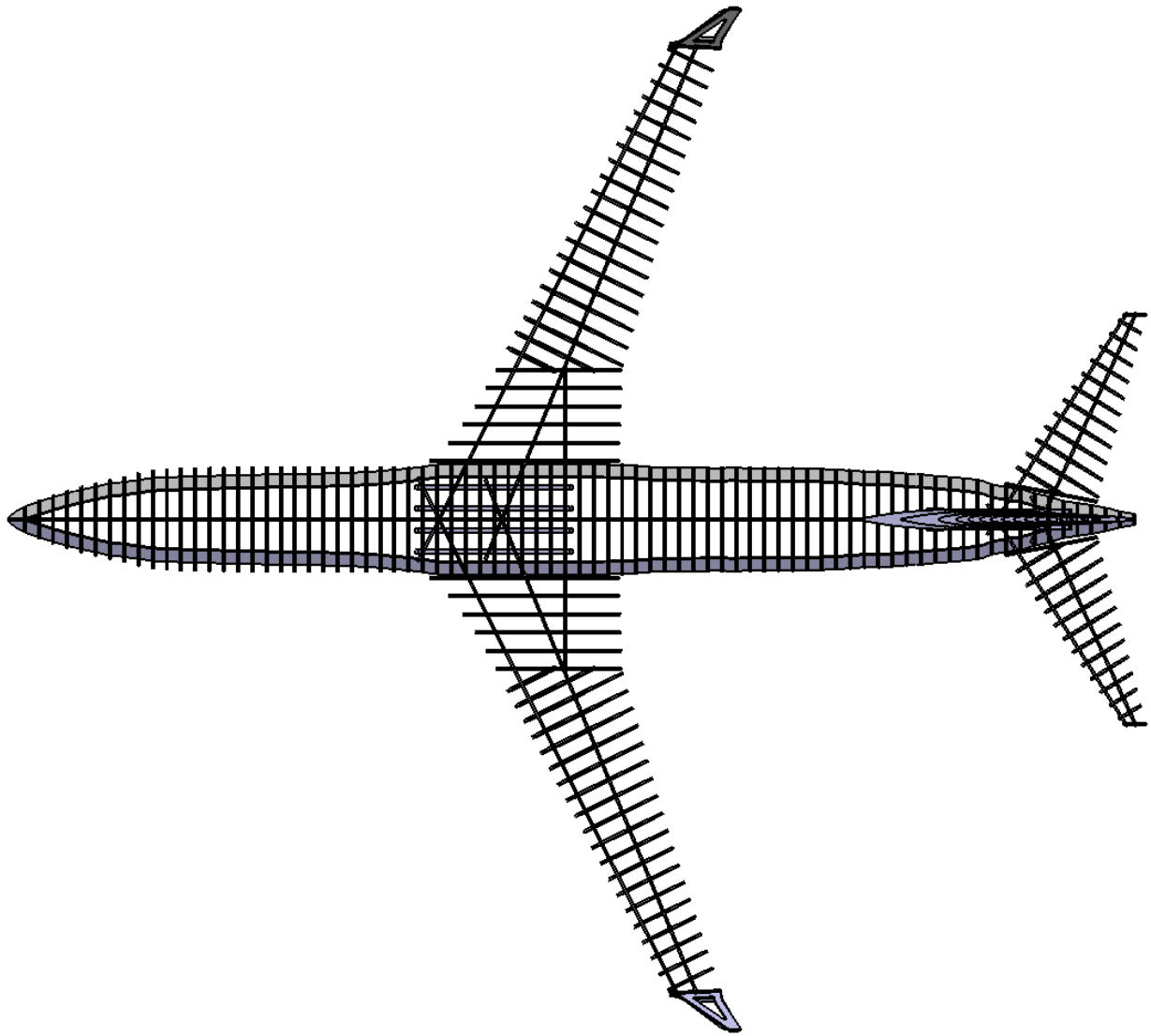


Figura 84: Vista en planta del disseny del Boeing 737-800 MAX

A continuació, es mostraran diverses vistes més detallades on es mostrin les parts més complexes del disseny.

A la figura 85 podem veure amb més detall la unió de l'ala i el fuselatge. Es pot observar com els travessers del fuselatge que estan a 120° es tallen al intersecar amb els travessers de les ales. Aquests travessers del fuselatge seran de gran ajuda en la fase de construcció del model a escala ja que posicionaran els travessers de les ales amb el correcte angle de fletxa.

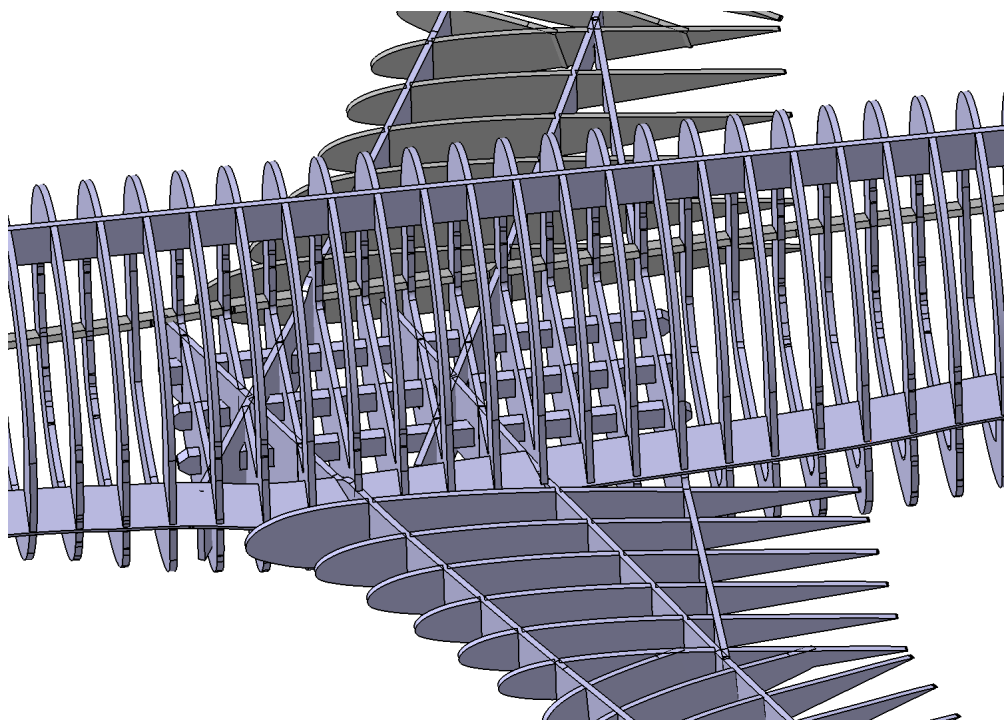


Figura 85: Vista en detall de la unió de l'ala amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX

Seguidament, a les figures 86 i 87 podem veure amb més detall la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge. A la figura 86 s'han ocultat les costelles i les dues parts finals del travesser superior del fuselatge per tal de tenir una millor visió de les interseccions que tenen lloc en aquest espai tan reduït. D'altra banda, a la figura 87 es poden veure totes les peces que participen en la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge. En la fase de construcció del model a escala ens seran de gran ajuda els travessers superiors del fuselatge per a posicionar els travessers dels estabilitzadors amb el correcte angle de fletxa i per a endurir aquesta unió.

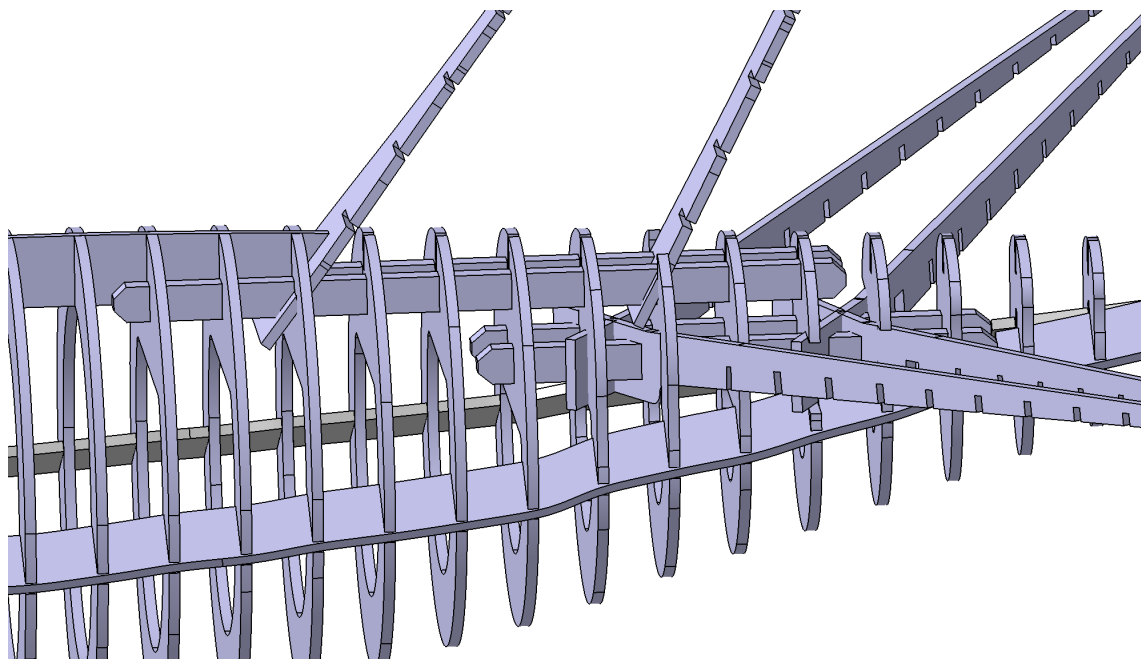


Figura 86: Vista en detall de la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX amb algunes peces ocultes

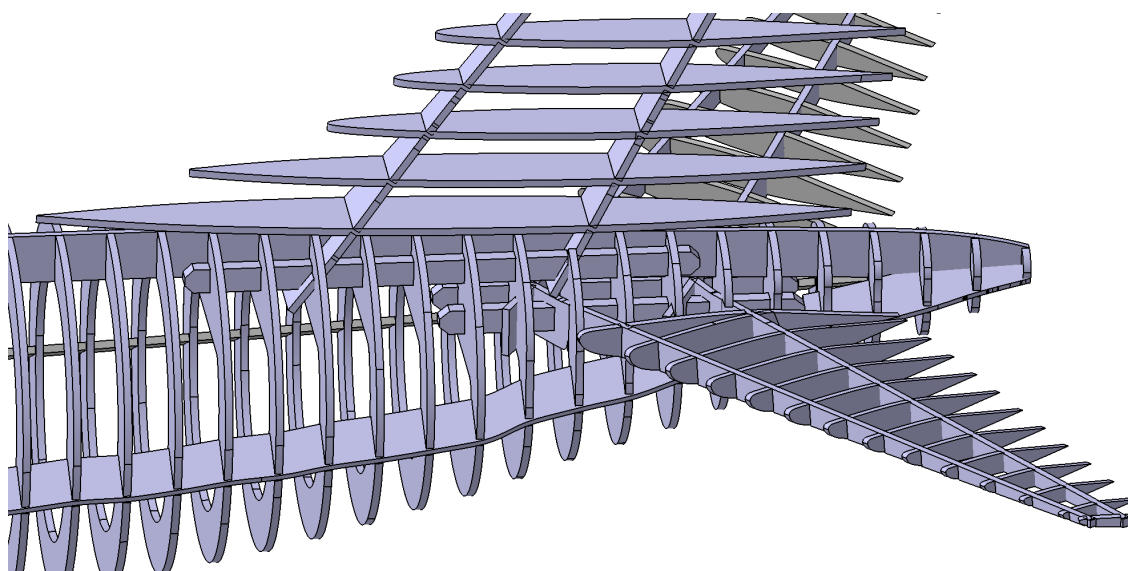


Figura 87: Vista en detall de la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge del Boeing 737-800 MAX

Tall làser de les peces

A meitat del disseny 3D es va fer una prova de tall làser amb l'empresa Laser Point Valencia per veure si el que s'estava dissenyant era correcte i per veure si les interseccions entre les peces eren de la mida correcta. També es va fer per conèixer el gruix real del material el qual podia no coincidir amb el gruix teòric de 3 mm.

Els requeriments de l'empresa de tall làser eren que, tot el que el làser havia de tallar, havia d'estar en color vermell i el que s'havia de gravar, és a dir marcar el material, havia d'estar en color blau. A més a més, totes les peces havien d'estar dins d'un rectangle de color verd. Les mesures d'aquest rectangle eren les que s'agafaven com a referència per escalar les peces. En el nostre cas els rectangles sempre tindran unes dimensions de 115 x 80 cm.

A la figura 88 es pot veure l'arxiu DXF amb les peces que es van enviar a tallar. Aquest arxiu conté totes les peces distribuïdes de la manera més eficient possible per aprofitar al màxim el material i reduir el cost del tall làser.

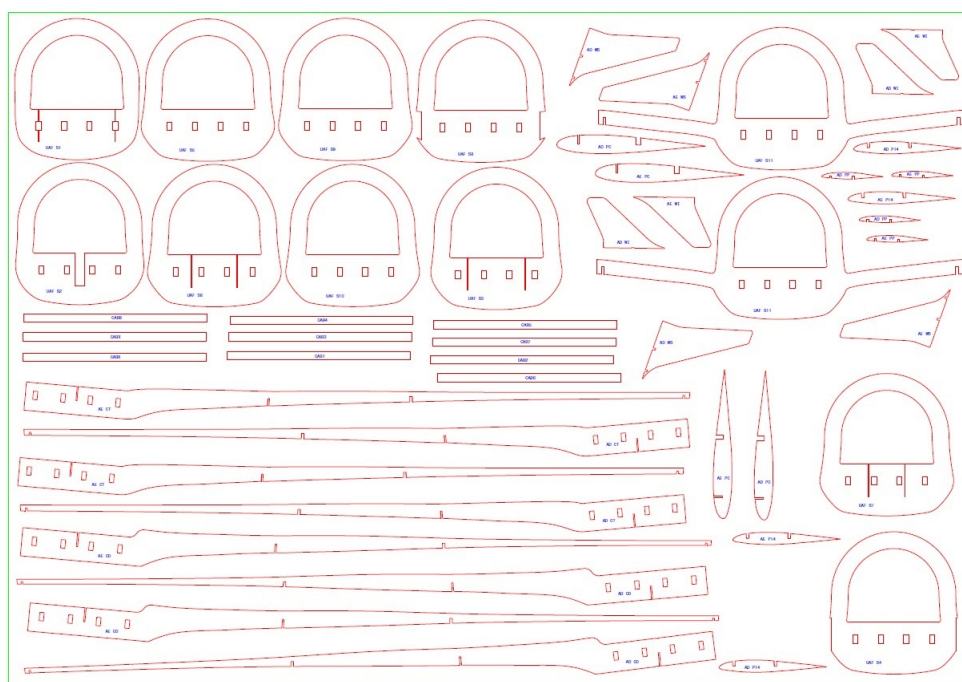


Figura 88: Arxiu DXF per a la prova enviat a l'empresa de tall làser

A la figura anterior es pot observar que els colors emprats per realitzar l'arxiu DXF són els estipulats per l'empresa de tall làser.

Com que el resultat del tall de les peces va ser satisfactori es va confiar amb aquesta empresa per al tall definitiu de les peces. Per tant, una vegada el disseny 3D de l'aeronau estava acabat es van crear els arxius DXF i es van enviar a l'empresa de tall làser.

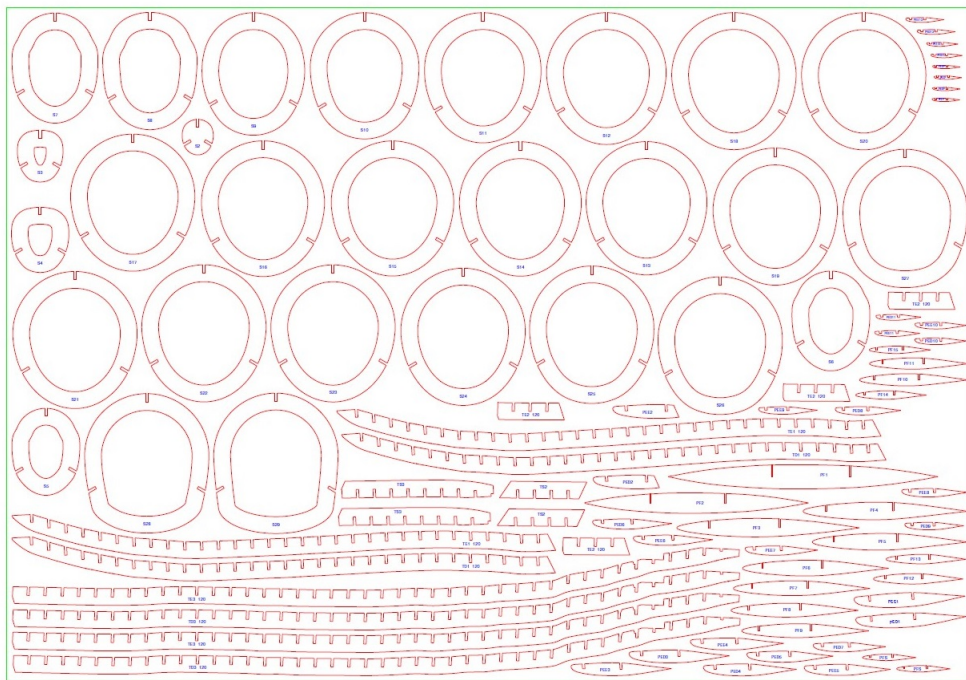


Figura 89: Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 1

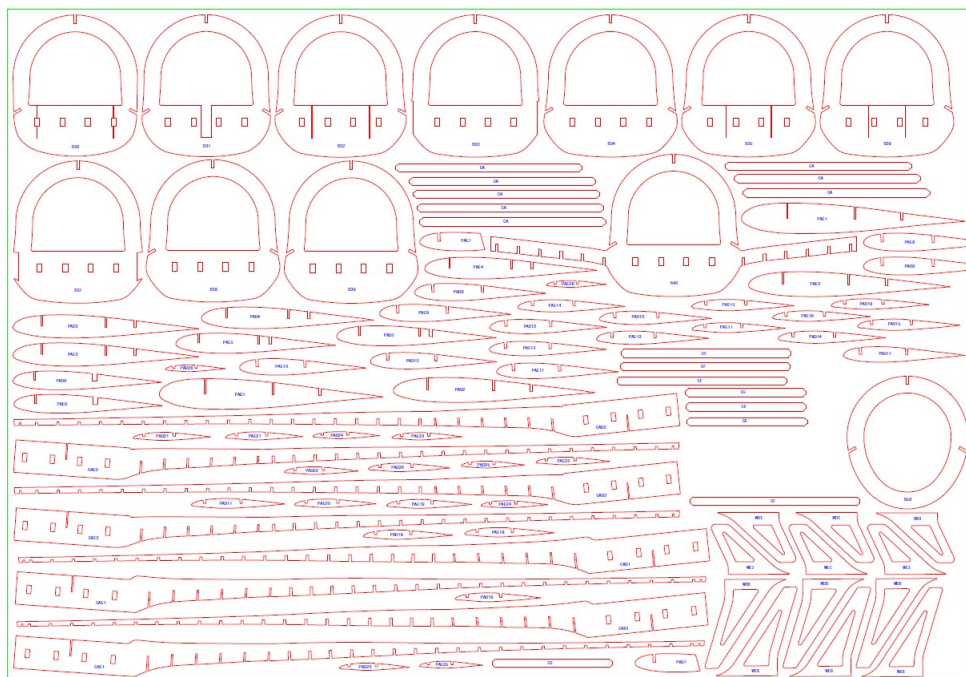


Figura 90: Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 2

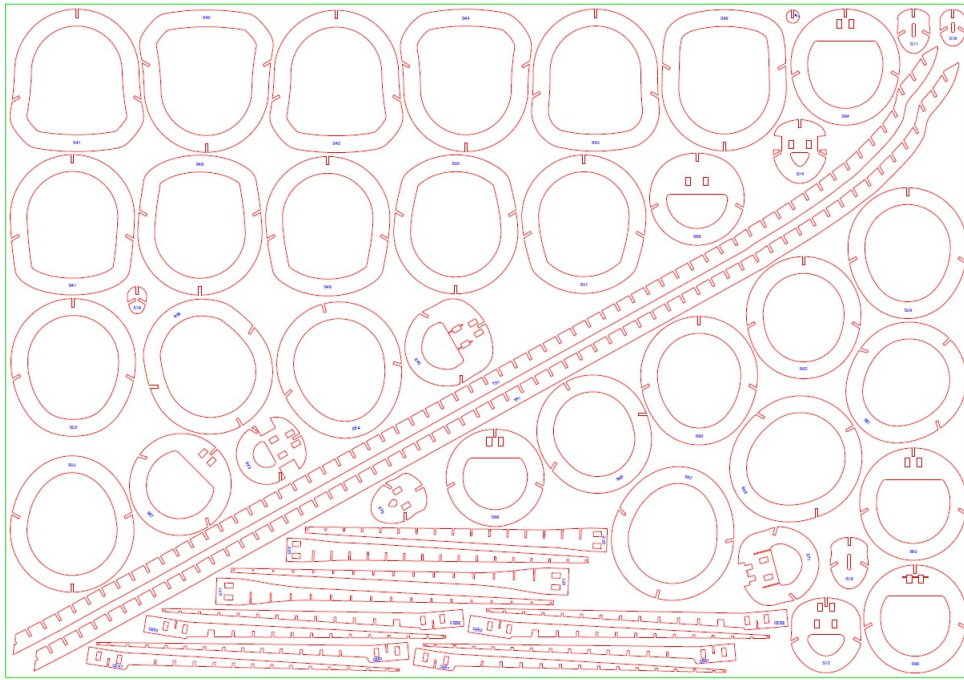


Figura 91: Arxiu DXF definitiu enviat a l'empresa de tall làser - 3

Quan l'empresa de transports va lliurar les peces definitives van arribar es va comprovar que les mesures fossin les correctes i es va detectar un error en el gruix del material. El gruix de les peces que va enviar l'empresa làser eren de 2,6 mm i per tant totes les interseccions entre les peces quedaven soltes i tenien molt de joc. Es va reclamar a l'empresa làser i no van posar cap problema en tornar a enviar les peces amb el gruix correcte ja que havia estat un error per la seva part.

Construcció del model a escala 1:25 del Boeing 737-800 MAX

6.1 Introducció

En aquest apartat s'explicaran tots els passos seguits per a construir el model a escala 1:25 de l'aeronau. Primer es parlarà de la prova que es va realitzar per assegurar-se que el disseny estava sent el correcte i s'explicaran els canvis que es van fer en el disseny. Seguidament es comentarà el procediment seguit per a construir el model a escala definitiu.

6.2 Construcció de la prova

Abans de construir el model definitiu es va fer una prova per veure que el que se estava dissenyant amb el CATIA era correcte. Per tant, es van enviar a tallar a l'empresa làser la unió de l'ala amb el fuselatge ja que era una de les parts més conflictives de l'aeronau. Durant el muntatge de la prova no es va observar cap error significatiu en el disseny, simplement es van observar alguns aspectes en els que es podia millorar per a que el resultat final fos el millor possible. No es comentarà com s'ha construït la prova per no repetir el que s'explicarà a la secció de la construcció del model a escala definitiu ja que aquesta part es torna a muntar exactament igual però amb les peces definitives que incorporen tots els forats necessaris. A les figures següents es pot veure el resultat del muntatge de la prova del model.



Figura 92: Vista isomètrica de la prova del model

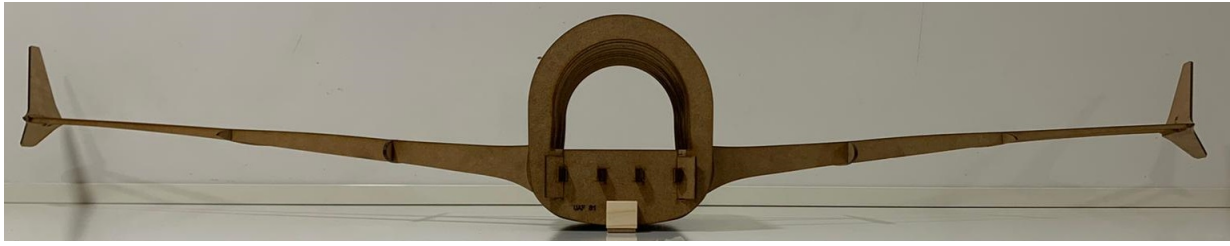


Figura 93: Vista en alçat de la prova del model

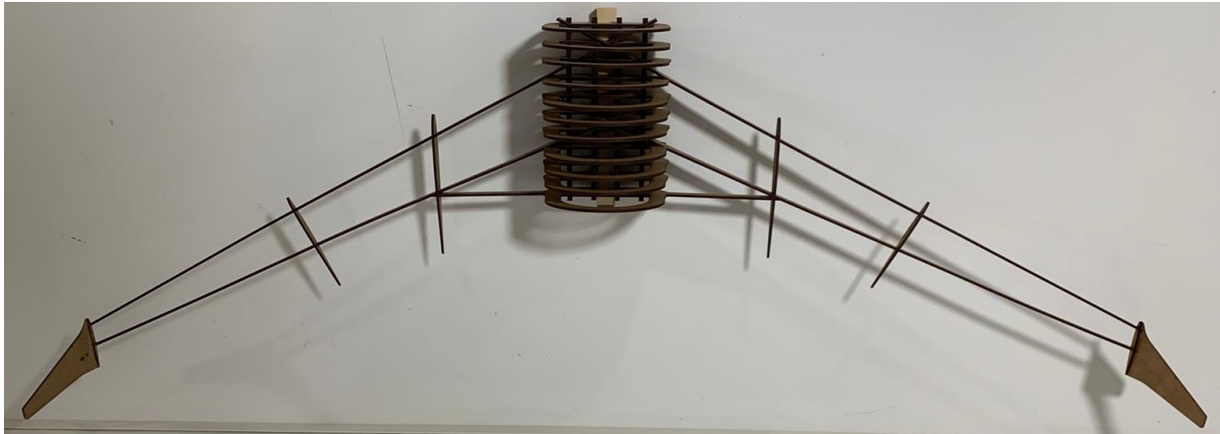


Figura 94: Vista en planta de la prova del model



(a) Vista en detall del winglet de la prova del model



(b) Vista en detall de l'interior de la prova del model

Figura 95: Vistes en detall de la prova del model

A les vistes principals, figures 92, 93 i 94, es pot veure que hi ha una fusta inferior. Aquesta fusta té forma de cinta i serveix per a mantindre la distància correcta entre cadascuna de les quadernes. En el disseny definitiu els encarregats d'aquesta funció són els tres travessers del fuselatge.

Com podem observar a la figura 95a el winglet de l'ala no presenta cap forat a l'interior. En el disseny final s'ha modificat i s'han incorporat dos forats interiors, tant en l'aleta superior com en la inferior per a reduir el pes a la punta de l'ala.

Una altra modificació ha estat als travessers de l'ala. A la figura 95b es pot veure que els travessers de l'ala queden per sota de les quadernes del fuselatge una vegada encaixats entre si. Tal i com es veurà al disseny final s'ha modificat aquesta amplada per a que tant els travessers com les quadernes queden tots a la mateixa altura.

6.3 Construcció del model a escala

Una vegada van arribar les peces bones de l'empresa de tall làser es va començar a construir el model a escala. A les figures 96, 97 i 98 es poden veure les tres planxes de 115 x 150 cm de MDF de 3 mm que van arribar amb les peces ja tallades, sols calia separar-les amb cura per tal de no trencar alguna peça.

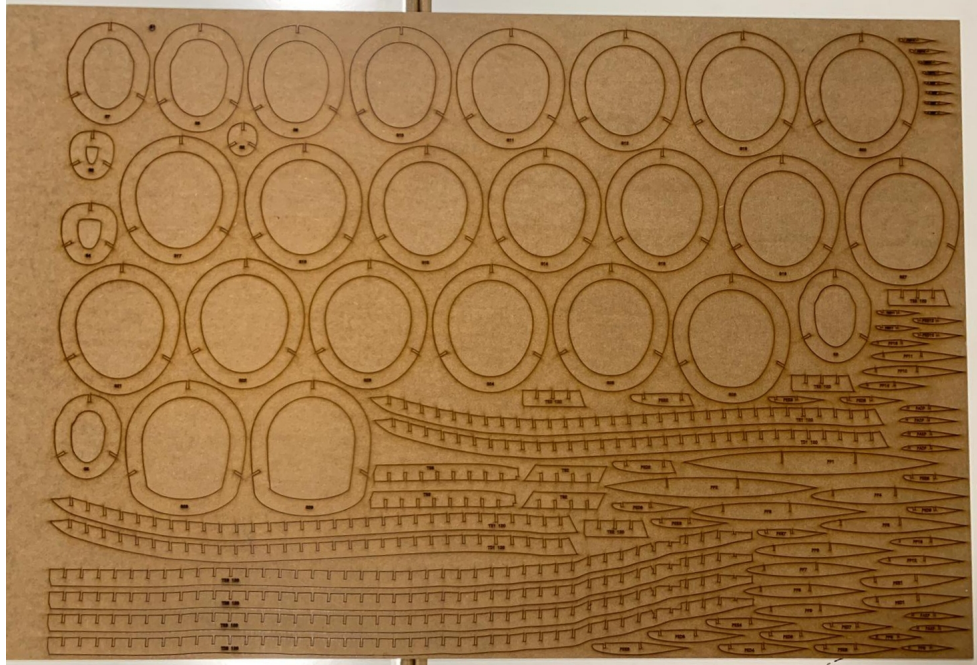


Figura 96: Planxa del tall làser 1

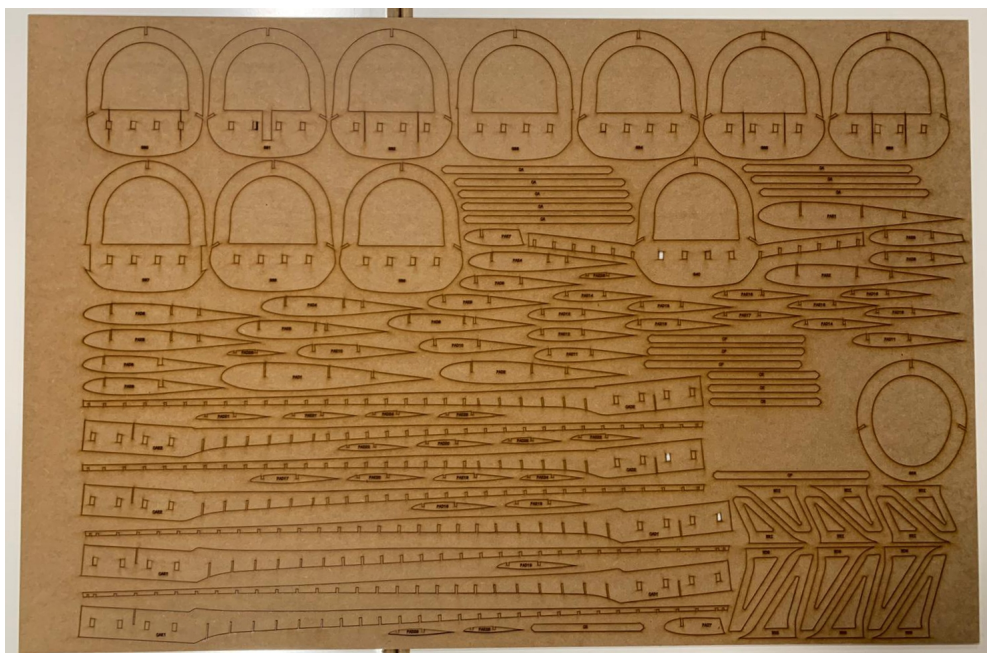


Figura 97: Planxa del tall làser 2

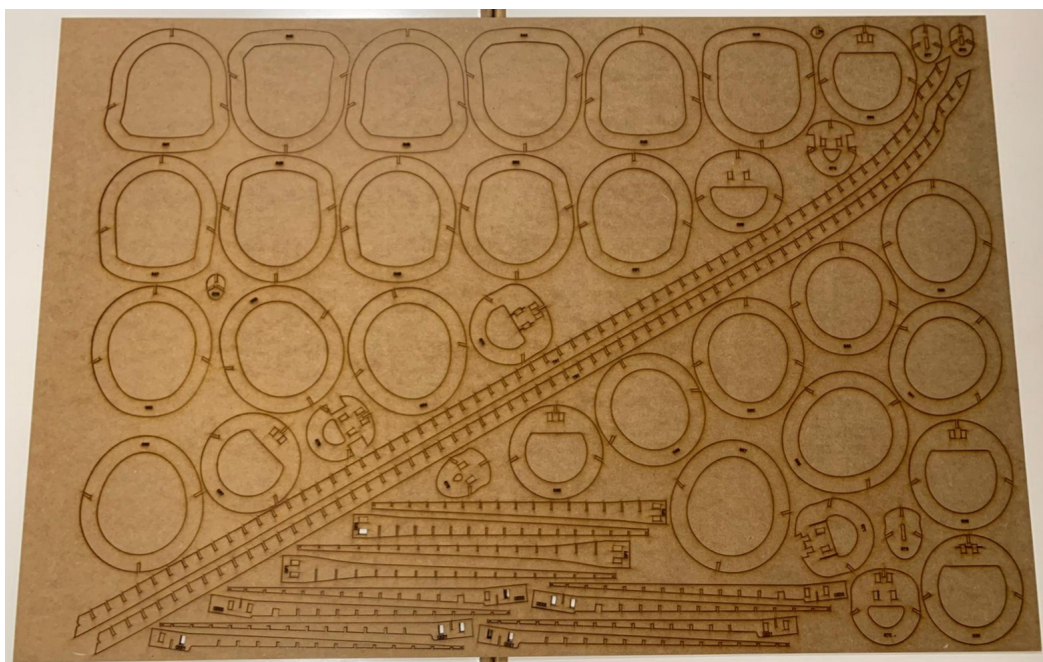


Figura 98: Planxa del tall làser 3

A continuació, les peces es van ordenar i es va comprovar que totes les peces estaven correctes i que no faltava cap. A la part de dalt de la figura 99 es poden veure totes les quadernes del fuselatge ordenades d'esquerra a dreta i de dalt a baix. A la part inferior es poden veure les costelles i travessers de les ales i dels dos estabilitzadors, els travessers del fuselatge, els winglets i les bigues d'unió de les ales i dels estabilitzadors amb el fuselatge.



Figura 99: Peces ordenades segons les diferents parts de l'aeronau

Seguidament es va començar a construir el model a escala. Per fer-ho, era necessari seguir un ordre rigorós per a que totes les peces es poguessin muntar.

6.3.1 Llimada de les peces

Per encaixar les peces es necessari llimar-les en l'angle correcte. Com ja s'ha comentat a la secció del disseny 3D de l'aeronau, el làsertalla amb un angle de 90° . Per tant, com que el disseny s'ha fet seguint les línies vermelles com es mostra a la figura 100 ara s'ha de llimar la part verda de cada peça que intersequi a un angle diferent a 90° .



Figura 100: Representació gràfica de la secció d'una peça tallada amb làser

Aquesta forma de treballar augmenta les hores dedicades al muntatge del model però una vegada llimades les peces la unió que queda és perfecta sense que falti material als costats de la unió. A més a més, amb aquest mètode si la llimada es fa en cura per a que encaixin les peces amb una mica de resistència no cal utilitzar cap tipus de cola. A la figura 101 es pot veure com s'ha llimat una quaderna per a que pugui encaixar amb el travesser de l'ala.

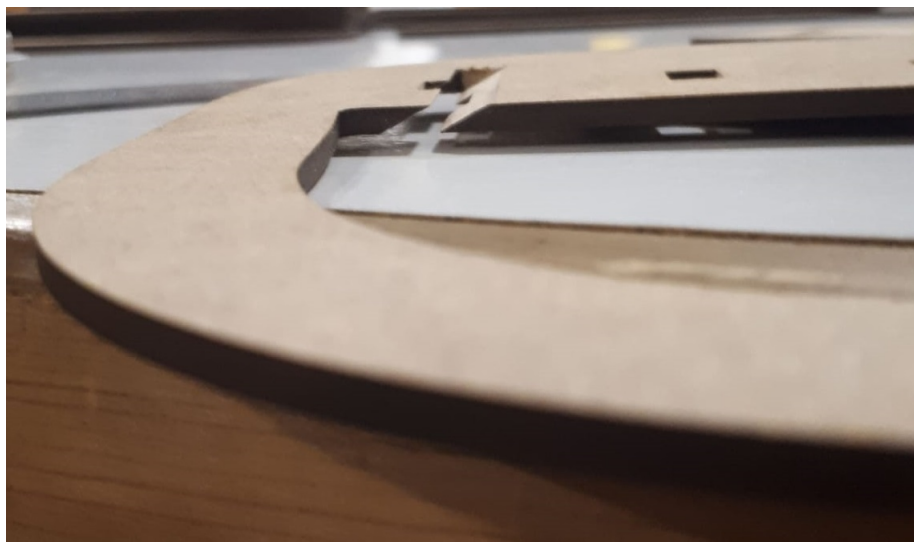


Figura 101: Forat d'una quaderna per a que pugui encaixar amb el travesser de l'ala

Per tant, abans de començar l'acoblament del model totes les peces s'han llimat amb l'angle pertinent en cada cas per a que es puguin interseccionar entre elles a la perfecció.

6.3.2 Unió entre l'ala i el fuselatge

Una vegada les peces han estat llimades, s'ha començat amb l'acoblament del model a escala.

El primer pas va ser muntar la unió entre l'ala i el fuselatge ja que és una de les parts més difícils i perquè ja s'havia muntat quan es va fer la prova. Per poder muntar aquesta part sense problemes es van seguir els següents passos:

- Primer es van encaixar els travessers davanters i posteriors de les ales entre si.
- Després es van encaixar les quadernes del fuselatge amb els travessers de les ales ja encaixats.
- A continuació, es van encaixar els travessers del fuselatge número 2 a 120° que van quedar atrapats entre els dos travessers de les ales.
- Per últim, es van inserir les bigues d'unio entre les ales i el fuselatge que són les encarregades de donar suport a l'estructura i de subjectar totes aquestes peces en el seu lloc.

El resultat de seguir aquests passos es pot veure en les següents figures.

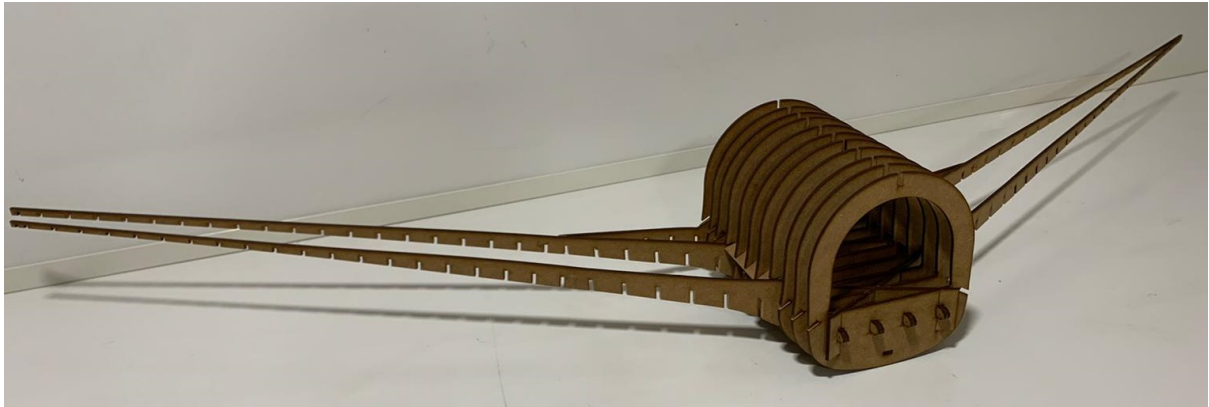


Figura 102: Vista isomètrica de la unió entre l'ala i el fuselatge

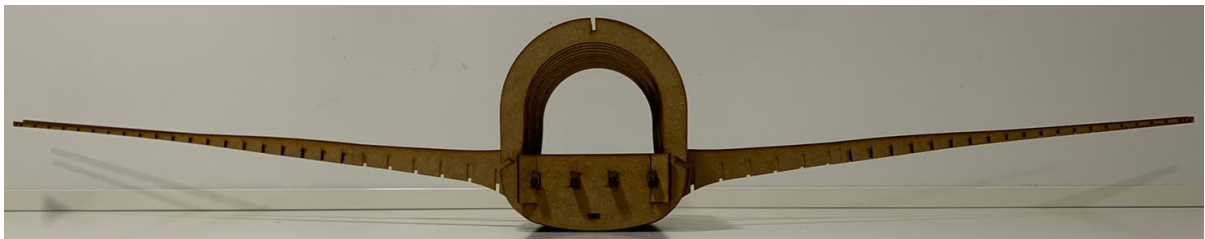


Figura 103: Vista en alçat de la unió entre l'ala i el fuselatge

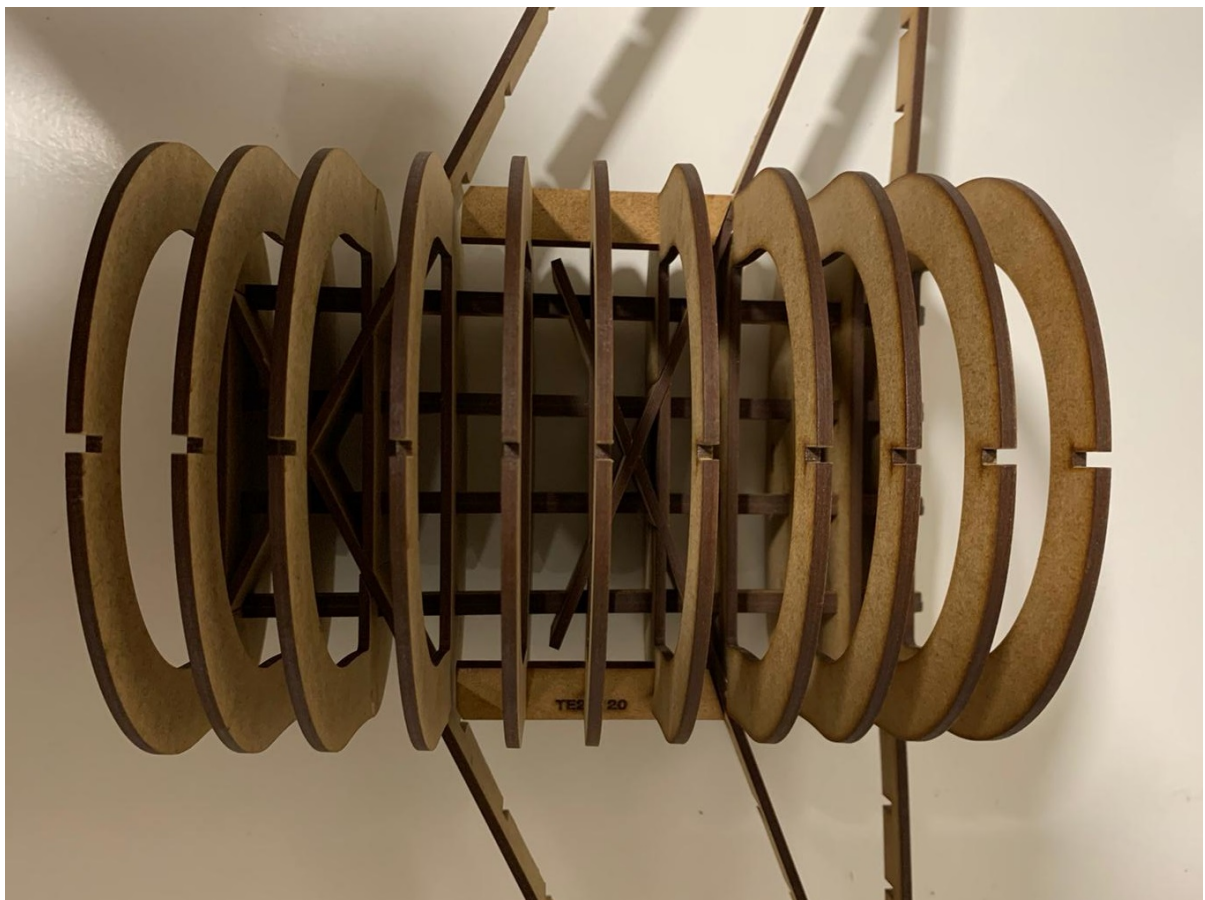


Figura 104: Vista en planta de la unió entre l'ala i el fuselatge



Figura 105: Vista en detall de l'interior de la unió entre l'ala i el fuselatge

Com podem veure és molt similar a la prova que es va realitzar però en aquest cas les peces incorporen tots els forats necessaris per a l'acoblament amb la resta de peces.

6.3.3 Unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge

En aquest apartat es comentarà com s'ha muntat la segona part més difícil del model ja que és on més interseccions de peces hi ha de tota l'aeronau. Aquesta part es va muntar seguint els següents passos:

- Primer es van encaixar els travessers davanters i posteriors de l'estabilitzador horitzontal.
- Després es van encaixar les quadernes del fuselatge amb els travessers de l'estabilitzador horitzontal.
- A continuació, es van encaixar els travessers del fuselatge número 2 i 3 superiors ja que quan es posen els travessers de l'estabilitzador vertical es quedaran atrapats.
- Després es van inserir les bigues d'unió entre l'estabilitzador horitzontal i el fuselatge.
- Seguidament, es van encaixar els travessers de l'estabilitzador vertical amb les quadernes del fuselatge.
- Per últim, es van inserir les bigues d'unió entre l'estabilitzador vertical i el fuselatge.

El resultat de seguir aquests passos en pot veure en les figures següents.

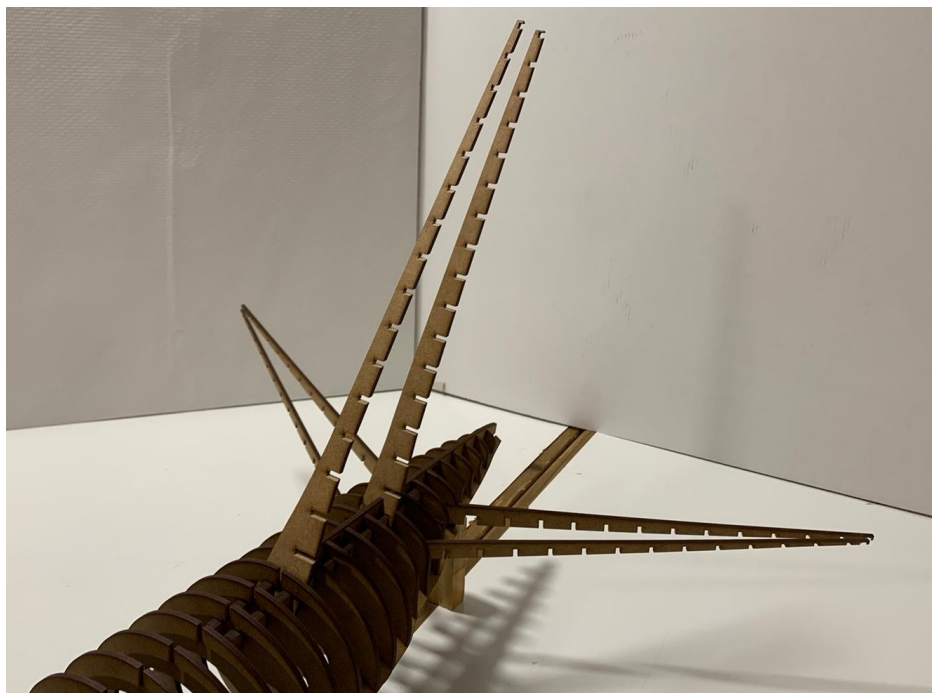


Figura 106: Vista isomètrica de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge

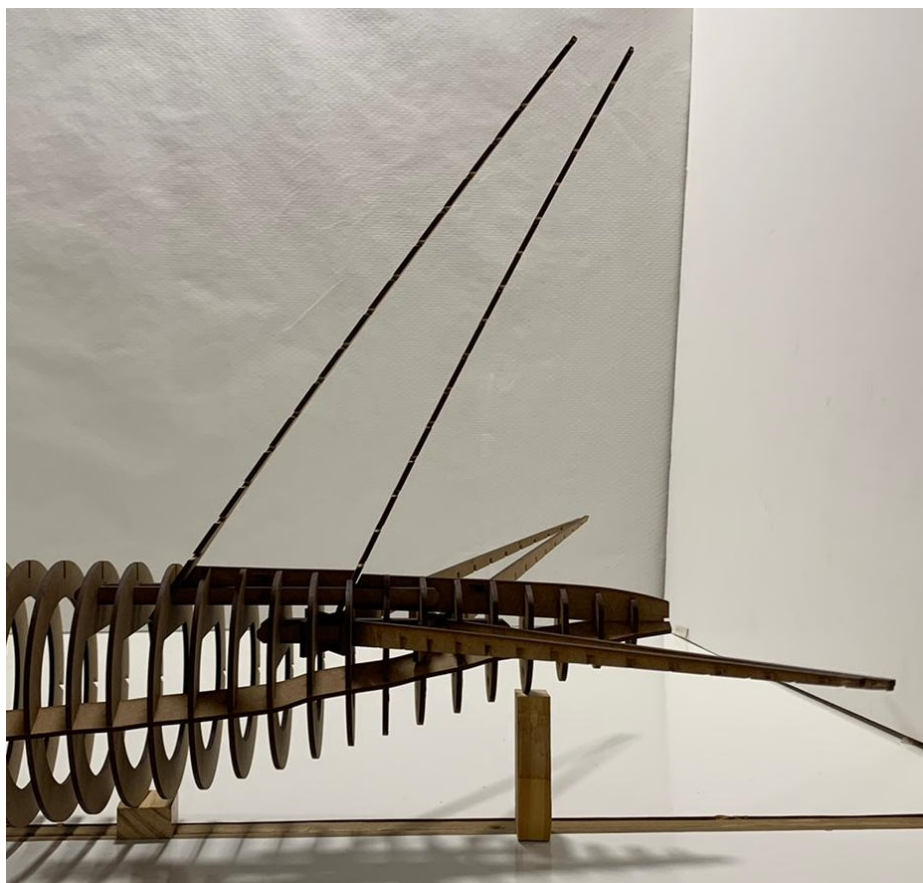


Figura 107: Vista de perfil de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge

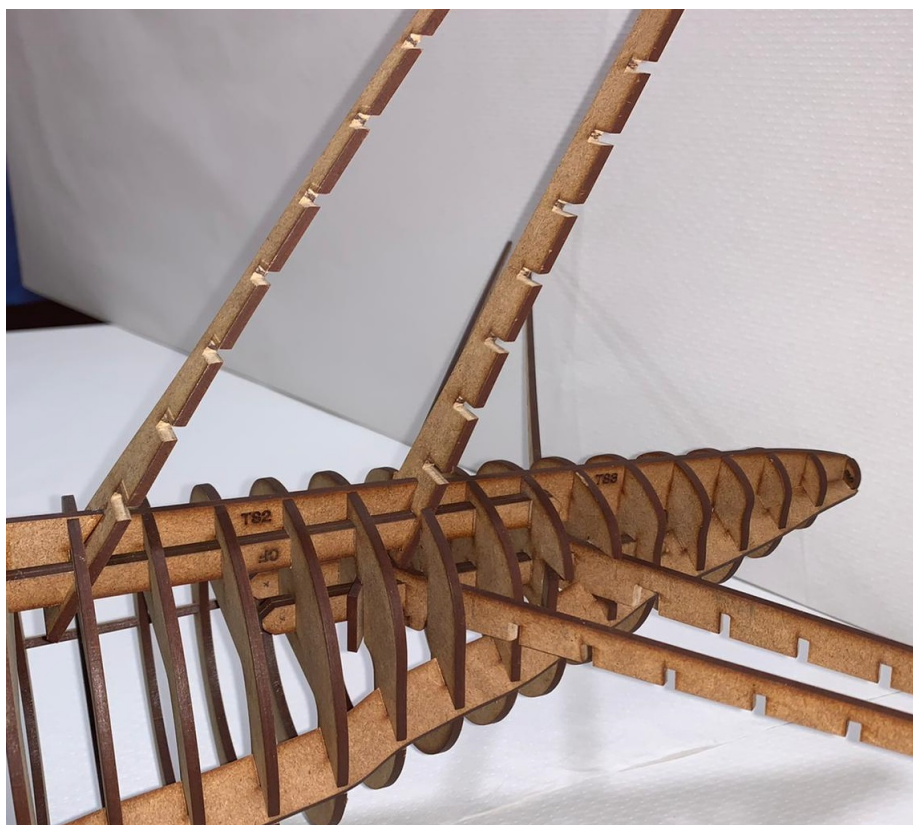


Figura 108: Vista en detall de l'interior de la unió entre els estabilitzadors de cua i el fuselatge

6.3.4 Quadernes entre les ales i els estabilitzadors de cua

Una vegada tenim la unió de les ales i dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge el que s'ha fet ha estat muntar les quadernes que existeixen entre aquestes dues parts per a unir les ales amb els estabilitzadors de cua. Els passos que es van seguir són els següents:

- Primer es va acoblar el travesser esquerre del fuselatge número 3 a 120° amb la unió dels estabilitzadors de cua amb el fuselatge.
- Seguidament es van encaixar les corresponents quadernes i la unió de l'ala amb el fuselatge amb el travesser esquerre del fuselatge número 3 a 120°.
- Per últim, es van encaixar el travesser dret del fuselatge número 3 a 120° amb les corresponents quadernes ja encaixades i la unió de l'ala amb el fuselatge.

El resultat de seguir aquests passos es pot veure en les figures següents.

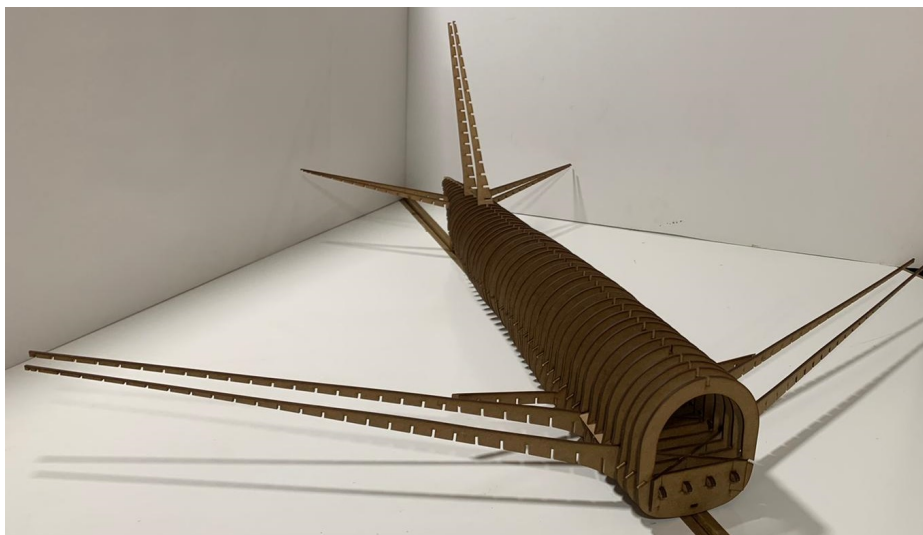


Figura 109: Vista isomètrica de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua

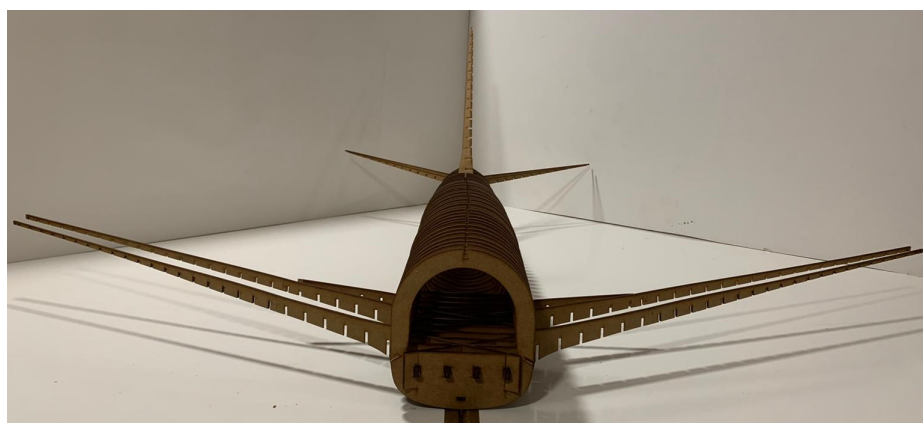


Figura 110: Vista en alçat de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua



Figura 111: Vista en detall de l'interior de la unió entre l'ala i els estabilitzadors de cua

6.3.5 Quadernes davanteres

En aquest apartat es muntaran les quadernes davanteres i s'acoblaran a l'estructura del model que ja tenim muntada. Els passos seguits per a dur aquest muntatge a terme han estat els següents:

- Primer es va acoblar el travesser del fuselatge número 1 superior amb l'estructura del model que ja tenim muntada.
- Després es van encaixar les quadernes davanteres amb aquest travesser.
- Per últim, es van encaixar els travessers del fuselatge número 1 a 120° amb l'estructura del model.

Una vegada completats aquests passos ja tenim quasi tota l'estructura de l'aeronau muntada sense utilitzar cap tipus de cola com ja es va preveure en apartats anteriors.

El resultat de seguir els passos esmentats prèviament es pot veure en les figures següents.

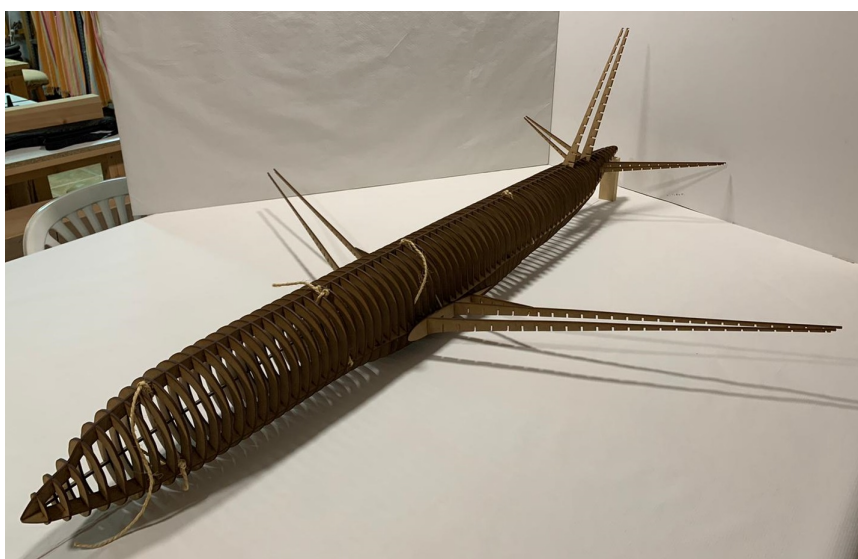


Figura 112: Vista isomètrica del model a escala sense costelles ni winglets



Figura 113: Vista en alçat del model a escala sense costelles ni winglets

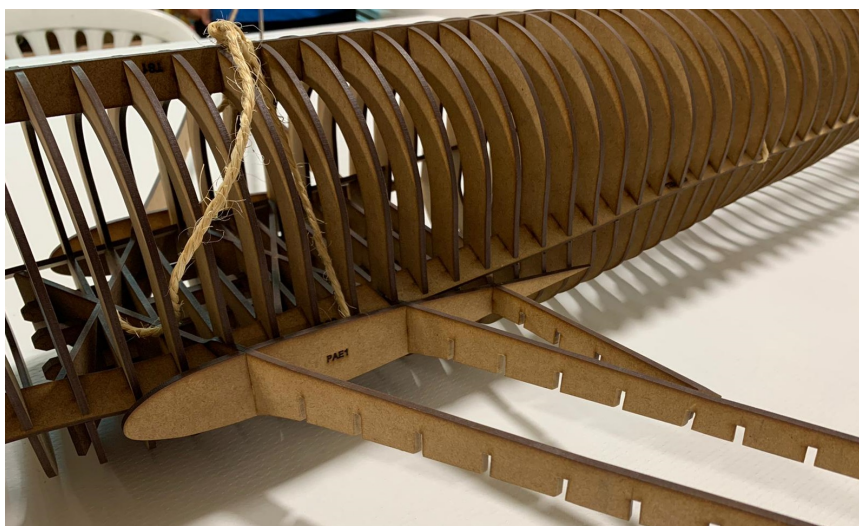


Figura 114: Vista en detall de la unió entre la part davantera i posterior de l'aeronau

Com podem veure a les figures anteriors, s'ha utilitzat corda de pita per subjectar l'estructura mentre es manipulava per a que no es desencaixés ninguna peça per accident. Una vegada tota l'estructura estigui acabada es retirarà ja que les diverses parts de l'aeronau són capaces de mantenir tota l'estructura al seu lloc corresponent.

6.3.6 Costelles i winglets

A continuació, s'han encaixat cada una de les costelles de les ales i dels estabilitzadors de cua.

A la figura 115 es pot veure la intersecció entre les costelles que són paral·leles al fuselatge i les que són perpendiculars al travesser davanter.

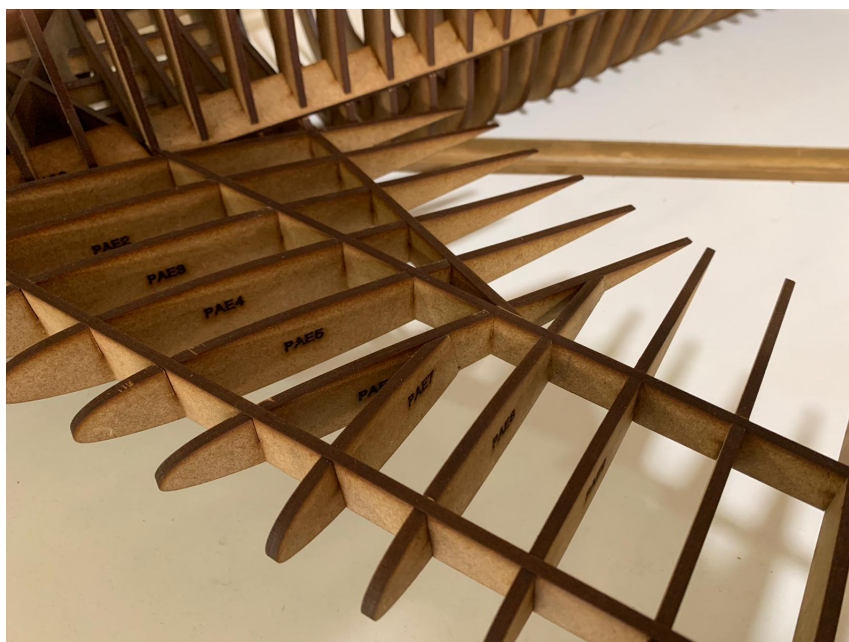


Figura 115: Vista en detall de la intersecció entre les costelles de l'ala

Seguidament a la figura 116 es pot veure la intersecció entre la primera i la segona costella de l'estabilitzador horitzontal.



Figura 116: Vista en detall de la intersecció entre les costelles de l'estabilitzador horitzontal

Per últim s'afegiran els winglets a l'estructura del model a escala. Aquesta és la única part de l'aeronau que està encolada ja que és inevitable utilitzar cola per a unir les dues aletes dels winglets entre si. Entre les aletes hi ha un angle de 87.42° . Per tal d'ajustar-se el màxim possible a aquesta mida s'ha utilitzat una falsa esquadra a l'hora d'encolar les aletes entre si.

Una vegada estan encolades, acoblem els winglets a la punta de les ales de l'aeronau respectant l'angle d'aquests amb el terra. A les figures 117 i 118 podem veure el resultat d'aquesta operació.

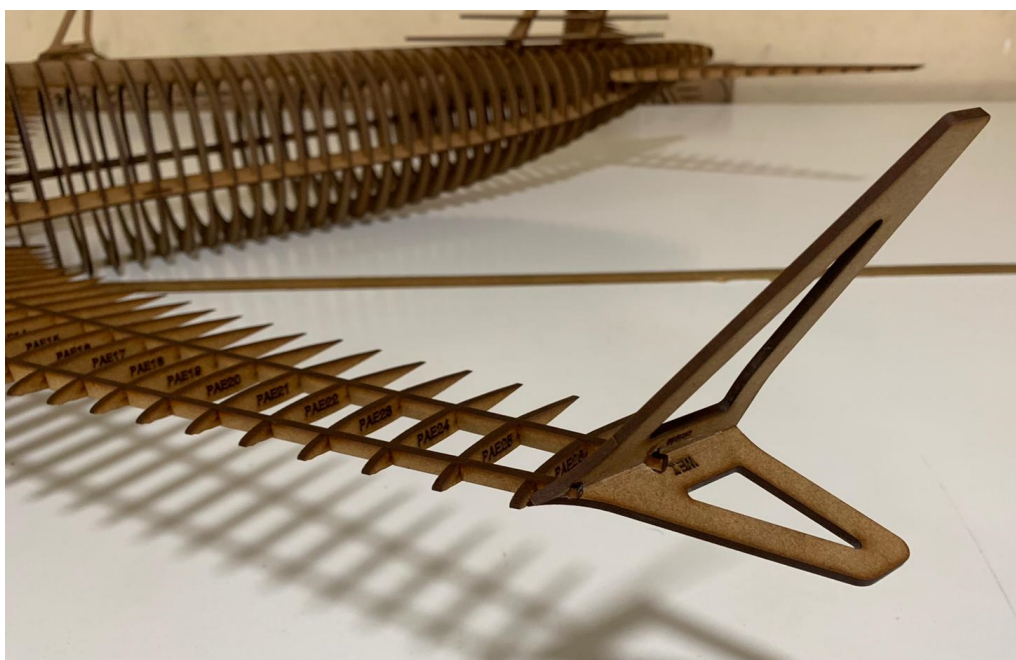


Figura 117: Vista isomètrica del winglet en l'ala

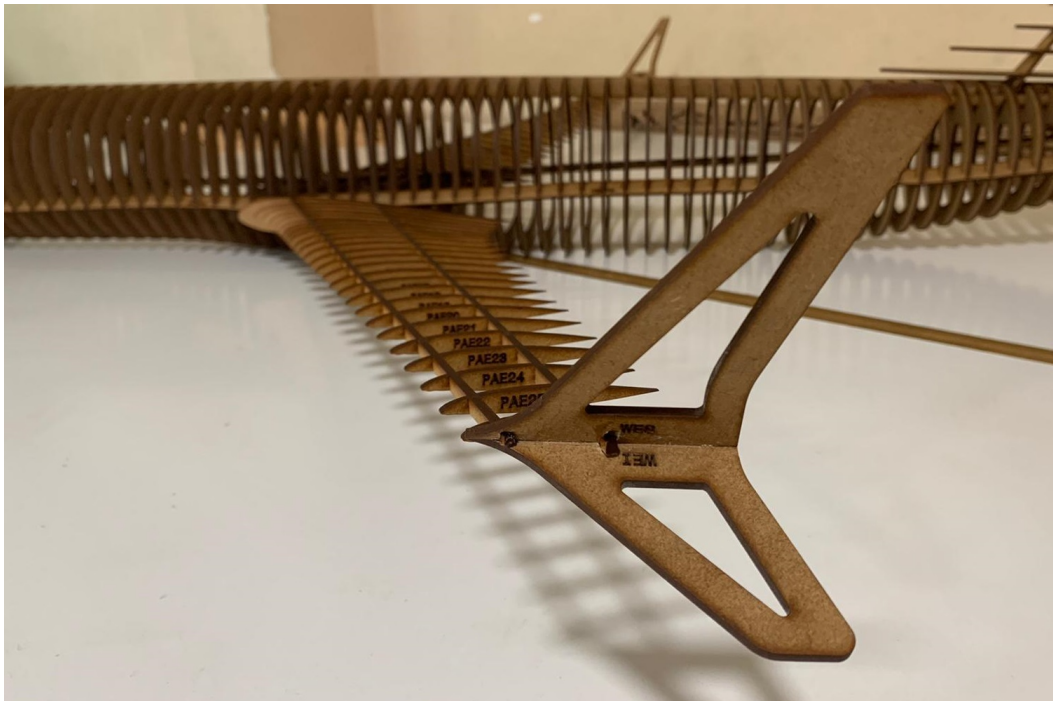


Figura 118: Vista de perfil del winglet en l'ala

Una vegada posicionats els winglets en la posició correcta ja tenim tot el model a escala construït.

6.4 Vistes del model a escala

En aquest apartat es mostren les vistes principals del model a escala una vegada finalitzat.

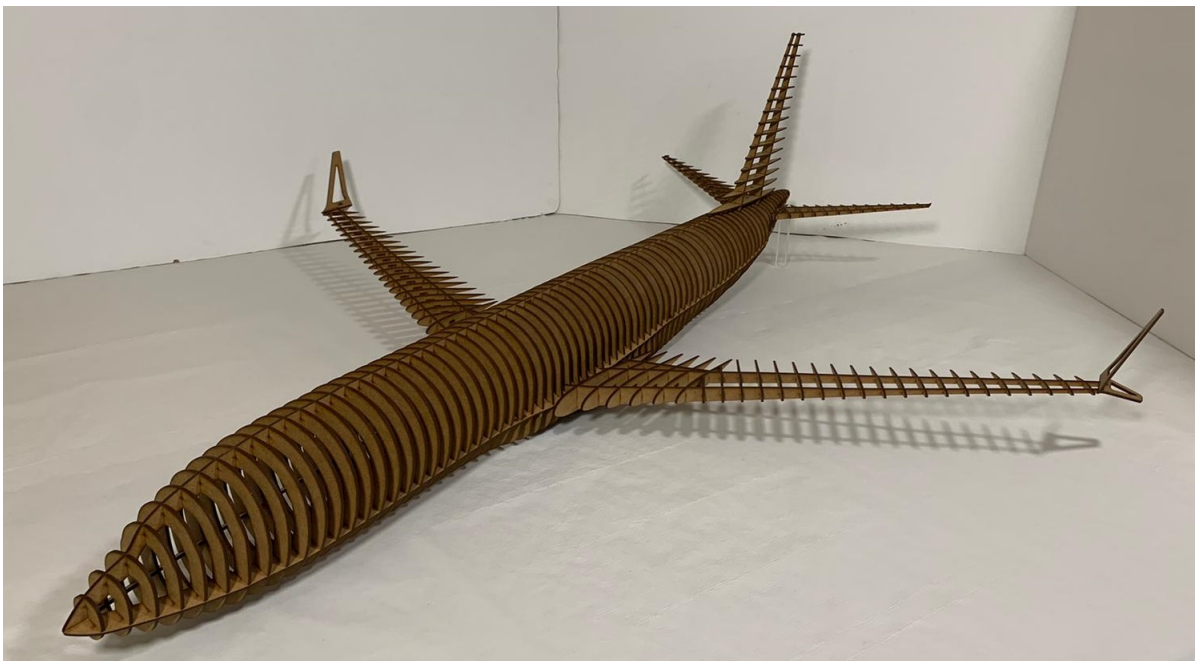


Figura 119: Vista isomètrica del model a escala finalitzat



Figura 120: Vista en planta del model a escala finalitzat



Figura 121: Vista en alçat del model a escala finalitzat

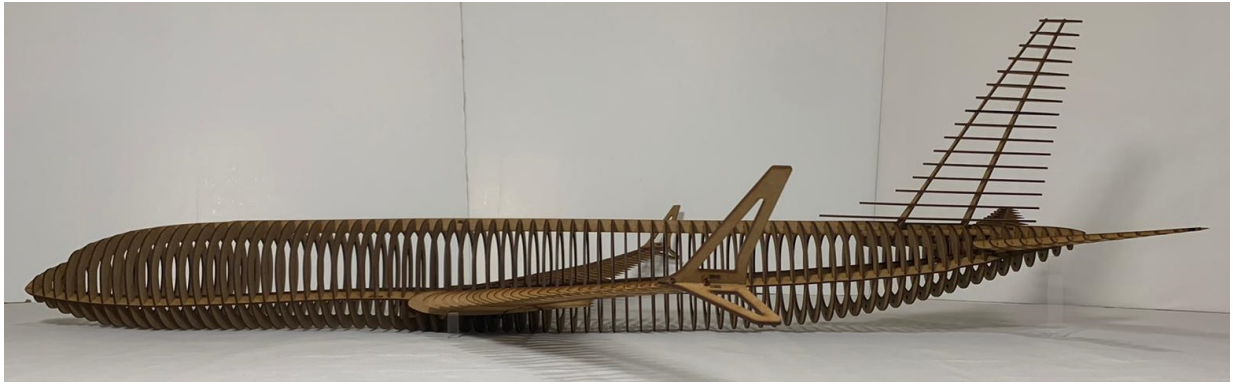


Figura 122: Vista de perfil del model a escala finalitzat

Per últim, es mostra una vista amb més detall dels estabilitzadors de cua del model a escala.



Figura 123: Vista en detall dels estabilitzadors de cua del model a escala finalitzat

Conclusions

S'ha complit l'objectiu principal del projecte, que era fer una anàlisi de l'estructura del Boeing 737-800 MAX, dissenyar l'estructura de l'aeronau amb CATIA i construir el model a escala 1:25 amb les peces dissenyades. També s'han complit tots els punts de l'abast durant el desenvolupament del projecte.

Personalment, he gaudit del procés de disseny i de la construcció de l'aeronau, especialment al comprovar que el resultat final ha estat satisfactori. En la construcció del model a escala ha sortit tot segons el planejat, fent que la semblança amb l'aeronau real sigui molt notable.

Algunes possibles ampliacions del projecte que no s'han abordat pel gran requeriment de temps que suposarien podrien ser les següents:

- Fer una anàlisi estructural més teòrica de l'aeronau on s'avaluen i s'estudien els esforços i les càrregues a les que està sotmesa durant el vol, l'enlairament i l'aterratge, així com també quan està en terra.
- Afegir parts més complexes al disseny 3D com els alerons, els timons de profunditat i direcció, els spoilers, etc.
- Afegir els motors en l'estructura de l'aeronau i dissenyar la seva correcta adaptació amb l'ala.
- Afegir el tren d'aterratge, els seus mecanismes i les corresponents portes per retraure'ls dins de l'estructura del fuselatge.
- Incloure seients, finestres i portes en el disseny de l'aeronau.

Aquestes són algunes de les interessants ampliacions possibles que es podrien fer al projecte. La majoria d'aquestes ampliacions requereixen el desenvolupament d'un altre projecte sencer.

Referències

- [1] The Boeing Company, Maintenance Facility and Equipment Planning Document. 1992.
- [2] Boeing 737 Specifications - Modern Airlines. Disponible a <https://modernairliners.com/boeing-737/boeing-737-specifications/>, 2016.
- [3] Five Ways To Tell the Boeing 737 MAX Apart From Older 737s. Disponible a <https://www.avgeekery.com/five-ways-to-tell-the-boeing-737-max-apart-from-older-737s/>, 2017.
- [4] What We Know About the Lion Air Flight 610 Crash - The New York Times. Disponible a <https://www.nytimes.com/2018/11/09/world/asia/air-lion-crash-610.html>, 2018.
- [5] Boeing 737 Max Lion Air crash caused by series of failures - BBC News. Disponible a <https://www.bbc.com/news/business-50177788>, 2019.
- [6] Boeing 737 Max: What went wrong? - BBC News. Disponible a <https://www.bbc.com/news/world-africa-47553174>, 2019.
- [7] Is Boeing 737-800 same as Boeing 737 Max 8? How to tell the difference between Boeing's 737 Next Generation planes. Disponible a <https://www.cbsnews.com/news/boeing-737-max-8-boeing-737-800-how-are-the-planes-different/>, 2019.
- [8] Timeline: A brief history of the Boeing 737 MAX — The Seattle Times. Disponible a <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/timeline-brief-history-boeing-737-max/>, 2019.
- [9] Airfoil Tools. Disponible a <http://airfoiltools.com/>, 2020.
- [10] Boeing: The Boeing Company. Disponible a <https://www.boeing.com/>, 2020.
- [11] LEAP-1B — Safran Aircraft Engines. Disponible a <https://www.safran-aircraft-engines.com/commercial-engines/single-aisle-commercial-jets/leap/leap-1b>, 2020.
- [12] Novedades – Boeing 737 MAX Updates. Disponible a <https://www.boeing.com/737-max-updates/es/>, 2020.
- [13] The Boeing 737 MAX. Disponible a <http://www.b737.org.uk/737max.htm>, 2020.
- [14] The largest blueprint and vector drawing collection. Disponible a <https://www.the-blueprints.com/>, 2020.
- [15] XFLR5. Disponible a <http://www.xflr5.tech/xflr5.htm>, 2020.
- [16] Boeing Commercial Airplanes. 737 MAX Airplane Characteristics for Airport Planning. (Rev E), 2019.
- [17] L. Calvo. Un año sin el Boeing 737 MAX — Fly News. Disponible a <https://fly-news.es/aviacion-comercial/ano-sin-boeing-737-max/>, 2020.